



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VILLE AHVENAINEN  
BETONILAATAN KUIVATUS LÄMMINILMAPUTKISTOLLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
nan tiedekuntaneuvoston kokouk-  
sessa 9. marraskuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**VILLE AHVENAINEN:** Betonilaatan kuivatus lämminilmaputkistolla

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 69 sivua, 13 liitesivua

Joulukuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

**Avainsanat:** betonilattia, betonilaatta, kuivatus, lämminilmaputkisto, kosteudenhallinta

Tämä tutkimus tehtiin Tulilattian ilmakiertoisen lämmitys- ja kuivatusjärjestelmän toimivuuden kokeilemiseksi. Järjestelmän kuivattava vaikutus perustuu putkissa virtaavan ilman kykyyn kuljettaa kosteutta laatasta pois. Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia järjestelmän eri muuttujien vaikutusta betonilaatan kuivumisnopeuteen ja putkista siirtyvän kosteusvirran suuruuteen. Tutkittavia muuttujia olivat putkijaon tiheys, sähkövastuksen käyttö lisälämmityksenä, päällystys sekä puhallettavan ilman lämmitys ja kuivaus.

Tutkimusta suoritettaessa käytiin läpi betonin kuivatukseen ja kosteusongelmiin liittyvää taustamateriaalia. Kokeellisessa osuudessa valettiin koelaatta, jonka lämpötilan ja kosteuden kehitystä seurattiin antureilla useassa eri mittauspisteessä. Lisäksi seurattiin putkiston kautta poistunutta kosteutta. Samaan tilaan valettiin varsinaisen tutkimuslaatan viereen verrokkilaatta, josta saatiin vertailuarvoksi samasta betonimassasta valmistetun ainoastaan pinnoiltaan kuivuvan laatan kuivumisnopeus vastaavissa ympäristöolosuhteissa.

Tutkimuksessa todistettiin järjestelmän toimivuus – tutkimuslaatta kuivui selvästi verrokkilaattaa nopeammin. Muita betonilaatan kuivumista nopeuttavia tekijöitä tutkimustulosten mukaan olivat sähkövastuksen käyttö, putkijaon tihennys ja puhallettavan ilman lämmitys ja kuivaus. Päällystys sen sijaan selvästi hidasti ja joissain mittauspisteissä pysäytti laatan kuivumisen kokonaan.

## ABSTRACT

**VILLE AHVENAINEN:** Drying of a Concrete Slab with a Warm Air Piping System

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 69 pages, 13 Appendix pages

December 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Juha Vinha

**Keywords:** concrete floor, concrete slab, drying, warm air pipe system, humidity management

This study was conducted in order to test the efficiency of the air-circulating heating and drying system of Tulilattia. The drying effect of the system is based on the ability of the floating air in the pipes to carry away moisture from the slab. The goal of the study was to examine the effect of different variables on the drying rate of the slab and on the moisture flow from the pipes. The examined variables were spacing of the pipes, using an electric resistor to provide extra heating, covering of the slab and heating and drying of the flowing air.

Background material concerning the drying of concrete and moisture problems was examined during the course of this study. In the experimental phase of the study, a test slab was cast and the development of its temperature and moisture was monitored via sensors in multiple spots. The moisture leaving the piping system was also monitored. A comparison slab was cast in the same room next to the primary examined slab, which made it possible to get the drying rate of a slab made from the same concrete in the same conditions while it was drying only from its surfaces.

The efficiency of the system was proven in the study, as the primary examined slab dried much faster than the comparison slab. According to the study results, other factors speeding the drying of the concrete slab were the use of an electrical resistor, tighter pipe spacing as well as heating and drying of the flowing air. Covering, on the other, hand clearly slowed down and in some spots stopped the drying process entirely.

## ALKUSANAT

Tämän diplomityön tekeminen aloitettiin loppuvuodesta 2015, valtaosa työstä tehtiin kuitenkin kalenterivuoden 2016 aikana muiden töiden ohessa. Työnteko oli koko ajanjaksolla sopivan kiireistä, vaikka lopussa otettiin luonnollisesti pieni loppukiri. Työn suorittamisen vuoksi ei jätetty väliin yhtäkään viikonloppumenoa. Kiitokset työn rahoituksesta, väliopponoinnista ja tutkimusaiheesta saavat Tulilattia Oy ja sen osakkaat Pasi Lehtimäki, Esa Tommola ja Jouko Pakkanen. Työn ohjaamisesta ja viimeisistä kommenteista työn hiomiseksi kiitän Tampereen teknillisen yliopiston professori Juha Vinhaa ja tutkija Eero Tuomista.

Tampereella, 28.11.2016

Ville Ahvenainen



# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	TAUSTATEORIA .....	2
2.1	Betonilaatan kosteuslähteet .....	2
2.1.1	Rakentamisaikainen kosteus .....	2
2.1.2	Rakennuksen ulkopuolelta tuleva kosteus .....	2
2.1.3	Käytönaikainen kosteus .....	3
2.1.4	Vesivahingot .....	3
2.2	Betonilaatan kuivuminen.....	3
2.2.1	Kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden vaikutus .....	5
2.2.2	Kuivatusmenetelmien vaikutus .....	5
2.2.3	Jälkihoitomenetelmien vaikutus.....	6
2.2.4	Betonimassan ominaisuuksien vaikutus.....	6
2.2.5	Laatan paksuuden vaikutus .....	7
2.2.6	Pinnoitteiden vaikutus vaadittuun kosteuspitoisuuteen .....	7
2.2.7	Alusrakenteen vaikutus .....	9
2.3	Kosteuden mittaaminen.....	9
2.3.1	Porareikämittaus.....	10
2.3.2	Näytepalamittaus.....	12
2.3.3	Pintakosteusilmaisim.....	13
2.3.4	Mittaus valuun asennetusta putkesta.....	13
2.3.5	Mittaaminen jatkuvasti betonin sisällä olevalla anturilla.....	13
2.3.6	Koepinnoitus .....	14
2.3.7	Kosteuden sitoutumiskoe .....	14
2.3.8	Veden haihtumisnopeuden mittaus .....	14
2.4	Kosteuden aiheuttamat home- ja sisäilmaongelmat .....	14
2.5	Tulilattian toimintaperiaate .....	15
2.6	Kosteuden siirtymisen laskennallinen tarkastelu .....	18
3.	BETONILAATAN KUIVUMISKOKEET.....	21
3.1	Koejärjestely.....	21
3.1.1	Valettavat laatat.....	21
3.1.2	Kuivatuslaitteisto .....	23
3.1.3	Mittauslaitteisto.....	24
3.1.4	Mittauspisteiden sijoittelu .....	24
3.2	Kokeen suoritus.....	26
3.2.1	Koelaatan valu ja käytetty betonimassa .....	26
3.2.2	Mittauslaitteiston kalibrointi .....	27
3.2.3	Antureiden liikuttelu .....	27
3.2.4	Mittausputken tiivistys.....	28
3.2.5	Lämmittimen ja kuivaimen käyttö .....	28
3.2.6	Sähkövastuksen käyttö.....	29

3.2.7	Tulosten lukeminen.....	30
3.2.8	Päällystys .....	30
4.	TUTKIMUSTULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	32
4.1	Laatan koetulokset.....	32
4.1.1	Laatan kosteuspitoisuuden kehitys.....	32
4.1.2	Kriittiset kosteuspitoisuudet.....	32
4.1.3	Laatan kosteuskajauma sivusuunnassa .....	34
4.1.4	Laatan kosteuskajauma korkeussuunnassa .....	35
4.1.5	Putkien k-jaon vaikutus.....	38
4.1.6	Sähkövastuksen vaikutus .....	40
4.1.7	Päällystyksen vaikutus .....	45
4.1.8	Mittauslämpötilan vaikutus.....	48
4.1.9	Kosteudenkehitys päällysteen ja betonin välissä .....	48
4.1.10	Näytepalamittaus.....	49
4.2	Kuivatusputkiston mittaustulokset .....	50
4.2.1	Meno- ja paluupuolen absoluuttiset kosteudet.....	50
4.2.2	Kanavalämmittimen vaikutus .....	52
4.2.3	Adsorptiokuivaimen vaikutus .....	54
4.2.4	Menoilman absoluuttisen kosteuden vaikutus .....	55
4.2.5	Syklisyyden vaikutus .....	57
4.2.6	Huoneilman olosuhteiden vaikutus.....	57
4.3	Hylätyt mittaustulokset .....	60
4.4	Mittausten tarkkuutta heikentävät tekijät .....	61
5.	YHTEENVETO .....	65
	LÄHTEET .....	67

LIITE 1: Antureiden siirtoloki

LIITE 2: Antureiden kalibrointitodistus

LIITE 3: Suhteellisen kosteuden arvot mittausjakson lopussa

LIITE 4: Keskiarvoistettu ja keskiarvoistamaton kuvaaja

LIITE 5: Betonimassan laboratoriotuloste

LIITE 6: Tutkimuslaatan mittauspisteet

LIITE 7: Mittaussektoreiden kosteuskajauma

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 2.1.</b>	<i>Likimääräinen aika lattiabetonin kuivattamiseksi 90 % RH suhteelliseen kosteuteen.....</i>	<i>4</i>
<b>Kuva 2.2.</b>	<i>Lattialämmityksen ja hionnan vaikutus kuivumiseen. ....</i>	<i>5</i>
<b>Kuva 2.3.</b>	<i>Betonin kuivumisen eri vaiheet: (a) täysin vedellä kyllästynyt tuore betoni (b) jatkuva kapillaarinen nousu (c) hygroskooppinen vaihe (kuivuminen vain haihtumalla).....</i>	<i>7</i>
<b>Kuva 2.4.</b>	<i>Päällystystyön edellytyksenä oleva betonin suhteellisen kosteuden enimmäisarvo .....</i>	<i>8</i>
<b>Kuva 2.5.</b>	<i>Laatan kosteusjakauma (a) välittömästi valun jälkeen (b) ennen pinnoitusta (c) pinnoituksen jälkeen kosteuspitoisuuden tasaannuttua. ....</i>	<i>10</i>
<b>Kuva 2.6.</b>	<i>Porareiän suhteellisen kosteuden (RH) kehittyminen ajan funktiona porauksen jälkeen. ....</i>	<i>11</i>
<b>Kuva 2.7.</b>	<i>Tulilattia-putkiston toimintaperiaate. Vasemmalla näkyy lämmin kuiva menoilma ja oikealla viileämpi kostea paluuilma .....</i>	<i>16</i>
<b>Kuva 2.8.</b>	<i>Laatan periaatteellinen kosteusjakauma punaisella ja kosteuden siirtymissuunta sinisellä eri tilanteissa. Putken ympäristössä vallitsee selvästi pienempi kosteuspitoisuus verrattuna muuhun laattaan.....</i>	<i>17</i>
<b>Kuva 3.1.</b>	<i>Koejärjestelyn suunnitelma .....</i>	<i>21</i>
<b>Kuva 3.2.</b>	<i>Virtausputkisto ja kosteusantureita varten asennetut putket. Ylhäällä päällystetty ja alhaalla päällystämätön puoli.....</i>	<i>22</i>
<b>Kuva 3.3.</b>	<i>Laattaan asennettu sähkökaapeli. ....</i>	<i>23</i>
<b>Kuva 3.4.</b>	<i>Lämmityspiirin kaavio. ....</i>	<i>23</i>
<b>Kuva 3.5.</b>	<i>Mittauspisteet kolmella eri korkeudella. ....</i>	<i>25</i>
<b>Kuva 3.6.</b>	<i>Umpiputkisen laatan mittauspisteet. ....</i>	<i>26</i>
<b>Kuva 3.7.</b>	<i>Mittausputken tiivistys. ....</i>	<i>28</i>
<b>Kuva 3.8.</b>	<i>Muovimatto asennettuna paikalleen.....</i>	<i>31</i>
<b>Kuva 4.1.</b>	<i>Kosteuden kehitys eri etäisyyksillä putkesta Tulilattia-puolella. ....</i>	<i>34</i>
<b>Kuva 4.2.</b>	<i>A-sektorin kosteuskuvaajat. ....</i>	<i>35</i>
<b>Kuva 4.3.</b>	<i>Tulilattia-puolen suhteellisen kosteuden kehitys eri syvyyksissä. ....</i>	<i>36</i>
<b>Kuva 4.4.</b>	<i>Sähkövastuspuolen kosteuden kehitys eri mittausvyvyksissä. ....</i>	<i>37</i>
<b>Kuva 4.5.</b>	<i>Kosteuskuvaaja k250- ja k450-jaon keskellä päällystämättömällä ja päällystetyllä Tulilattia-puolella. ....</i>	<i>38</i>
<b>Kuva 4.6.</b>	<i>Kosteuskuvaajat 50 mm:n etäisyydellä putkesta päällystämättömällä Tulilattia-puolella. ....</i>	<i>39</i>
<b>Kuva 4.7.</b>	<i>Kosteuskuvaaja k250- ja k450-jaolla päällystämättömällä ja päällystetyllä sähkövastuspuolella putkijaon keskellä. ....</i>	<i>40</i>
<b>Kuva 4.8.</b>	<i>Kosteuskuvaajat 100 mm:n syvyydessä päällystetyllä ja päällystämättömällä puolella. ....</i>	<i>41</i>

<b>Kuva 4.9.</b>	<i>Kosteuskuvaajat 50 mm:n etäisyydellä Tulilattia-putkesta päällystetyllä puolella (k450).</i>	42
<b>Kuva 4.10.</b>	<i>Kosteuskuvaajat 50 mm:n etäisyydellä Tulilattia-putkesta päällystämättömällä puolella (k450).</i>	43
<b>Kuva 4.11.</b>	<i>Kosteuskuvaaja k450-jaon keskellä päällystetyllä ja päällystämättömällä puolella.</i>	44
<b>Kuva 4.12.</b>	<i>Kosteuskuvaaja k250-jaon keskellä päällystetyllä ja päällystämättömällä puolella.</i>	45
<b>Kuva 4.13.</b>	<i>Kosteuskuvaajat Tulilattia-puolelta k250- ja k450-jakojen keskeltä. ....</i>	46
<b>Kuva 4.14.</b>	<i>Kosteuskuvaajat sähkövastuspuolelta k250- ja k450-jakojen keskeltä. ....</i>	47
<b>Kuva 4.15.</b>	<i>Mittauspisteen E2 48 lämpötila- ja kosteuskuvaaja 11 vuorokauden ajalta.</i>	48
<b>Kuva 4.16.</b>	<i>Kosteuskuvaaja päällysteen alta sähkövastus- ja Tulilattia-puolen k450-jaon keskeltä sekä Tulilattia-puolen putken päältä.</i>	49
<b>Kuva 4.17.</b>	<i>Meno- ja paluuilman absoluuttiset kosteudet Tulilattia- ja sähkövastuspuolella.</i>	51
<b>Kuva 4.18.</b>	<i>Menoilman lämpötilan ja kosteusvirran kuvaajat vuorokauden ajalta 29.5.2016. Kuvaajissa näkyy selkeästi tuolloin käytössä ollut kanavalämmittimen kuuden tunnin syklitys.</i>	52
<b>Kuva 4.19.</b>	<i>Kosteusvirran ja menoilman lämpötilan kuvaajat koko mittausjaksolta Tulilattia- ja sähkövastuspuolelta.</i>	53
<b>Kuva 4.20.</b>	<i>Menoilman absoluuttisen kosteuden ja lämpötilan sekä kosteusvirran kuvaajat yhden vuorokauden ajalta 12.6.2016. Kanavalämmittimen ja kuivain olivat samassa kuuden tunnin syklissä.</i>	54
<b>Kuva 4.21.</b>	<i>Kosteusvirran ja menoilman absoluuttisen kosteuden kuvaajat Tulilattia- ja sähkövastuspuolella koko mittausjaksolta.</i>	56
<b>Kuva 4.22.</b>	<i>Meno-, paluu- ja huoneilman lämpötilakuvaajat Tulilattia- ja sähkövastuspuolella.</i>	58
<b>Kuva 4.23.</b>	<i>Meno-, paluu- ja huoneilman suhteellisen kosteuden kuvaajat Tulilattia- ja sähkövastuspuolella.</i>	59
<b>Kuva 4.24.</b>	<i>Meno-, paluu- ja huoneilman absoluuttisen kosteuden kuvaajat Tulilattia- ja sähkövastuspuolella.</i>	60

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

RH	engl. relative humidity, ilman suhteellinen kosteus
% RH	ilman suhteellinen kosteus prosentteina kyllästyskosteuspitoisuudesta
T	lämpötila
°C	celsius-aste, lämpötilan yksikkö
kW	kilowatti, tehon yksikkö

# 1. JOHDANTO

Betonilattioiden kosteusvaurioiden aiheuttamia vuotovahinkoja korvattiin vuonna 2012 36 000 kappaletta (Haapaniemi 2014). Paikallavaletun betonilaatan kuivumisaika on usein myös uudisrakennuskohteissa työmaan etenemistä rytmittävä tekijä. Toisin sanoen, mitä nopeammin betonilaatan saa rakennusvaiheessa kuivatettua, sitä nopeammin rakennuskohde on mahdollista saada valmiiksi. Uudiskohteissa laatan liian nopea pinnoittaminen voi johtaa käytönaikaisiin home- ja sisäilmaongelmiin, kun pinnoitteen alle jäävässä kosteassa betonissa syntyy homekasvusto. Aikataulu- ja kustannussyyt saattavat johtaa hätiköintiin ja liian aikaiseen laatan pinnoittamiseen. Rakennusvirheiden korjaaminen jälkikäteen aiheuttaa lisäkustannuksia ja aikataulun venymistä. Lisäksi ne heikentävät asiakastytyväisyyttä sekä yrityksen ja rakennusalan imagoa. Kehittyneemmällä kuivatusmenetelmillä rakennusaikaa on mahdollista lyhentää ja kuivattaa myös käytön aikana kastuneita rakenteita.

Tässä työssä tutkittiin Tulilattia-järjestelmän ilmakiertoisen putkiston ja siihen yhdistetävän sähkövastuksen vaikutusta betonilaatan kuivumisnopeuteen ja -aikaan. Betonin kuivumisen ja kosteuslähteiden taustateoriaa tutkittiin kirjallisuudesta ja työohjeista. Tampereen Atalaan tehtiin koevalu, josta mitataan betonin kosteuspitoisuus eri mittauspisteistä eri ajankohtina. Tutkittavia asioita olivat putkien k-jaon, sähkövastuksen, mitaussyvyyden ja päällystämisen vaikutus kuivumisnopeuteen. Tuloksia verrattiin samassa tilassa olevaan verrokkilaattaan, jonka annettiin kuivua vapaasti ilman ulkopuolista lämmitystä tai kuivatusta. Tavoitteena oli tutkia järjestelmän eri muuttujien vaikutusta yhdessä ja erikseen laatan kuivumisnopeuteen ja kosteuden poistumisnopeuteen putkiston kautta. Kuivumisajan lyhenemisen vaikutusta työmaatyöskentelyyn on myös pohdittu. Työn merkittävimmät saavutukset ovat järjestelmän toimivuuden osoittaminen ja kuivumisajan määrittäminen muuttujien eri yhdistelmillä. Työssä ei tutkittu muiden kuivatusmenetelmien toimivuutta, betonissa olevan kosteuden haihtumista pintojen kautta, käytetyn betonimassan vaikutusta eikä tapausta, jossa betonilaatta pääsisi kuivumaan ylä- ja alapinnastaan.

Tämän työn luvussa 2 käsitellään betonin kosteuslähteiden, kuivumisen ja kosteuden mittaamisen teoriaa sekä kosteusvaurioiden aiheuttamia sisäilma- ja homeongelmia ja tutkitavan järjestelmän toimintaperiaatetta. Luvussa **Virhe. Viitteen lähde ei löytynyt.** esitellään tarkemmin koejärjestely, kokeen suoritus, koetulokset ja eri muuttujien vaikutus koelaatan kuivumiseen. Luvussa 5 vedetään yhteen tutkimuksen tärkeimmät tulokset ja johtopäätökset ja esitetään suositukset mahdollisista jatkotutkimuksista.

## 2. TAUSTATEORIA

### 2.1 Betonilaatan kosteuslähteet

Betonin kosteuslähteinä voivat toimia esimerkiksi rakennusaikainen kosteus, erilaiset vesivahingot, maaperästä nouseva kosteus, sade- tai sulamisvedet ja käyttövesi. Eri mittauskohdista saaduista arvoista voidaan päätellä kosteuden siirtymisen suunta, jolloin myös mahdollinen kosteuslähde on mahdollista paikantaa. (RT 14-10984 2010)

#### 2.1.1 Rakentamisaikainen kosteus

Paikallavaletuissa betonirakenteissa merkittävin kosteuslähde on rakentamisaikainen kosteus (Leivo *et al.* 2008). Kaikki betonimassassa oleva vesi ei osallistu betonin lujittumiseen liittyvään hydrataatioreaktioon sementin ja veden välillä, jolloin se jää lujittuneeseen betoniin ylimääräiseksi kosteudeksi. Jälkihoitovaiheessa tehty sumutus ei merkittävästi vaikuta kuivumisaikaan, mutta ylemmiltä rakenteilta tai sadevedestä tuleva kosteus pidentää kuivumiseen kuluvaa aikaa huomattavasti, sillä jo osittain kuivuneeseen betoniin imeytynyt vesi haihtuu hyvin hitaasti. Myös betonin päälle levitetty tasoite sisältää haihdutettavaa kosteutta. (By45/BLY7 2002)

Betonelementit saattavat olla tehtaalta lähtiessä suhteellisen kuivia, mutta ne kastuvat hyvin usein kuljetuksen aikana, jolloin niidenkin täytyy antaa kuivua riittävästi ennen pinnoitteen asennusta. Ontelolaatan onteloissa saattaa pahimmillaan olla jäätynyttä vettä, joka käytönaikaisen lämmityksen seurauksena sulaa ja valuu alempiin rakennekerroksiin. (Merikallio *et al.* 1997)

#### 2.1.2 Rakennuksen ulkopuolelta tuleva kosteus

Helsingin kouluissa vuonna 1997 tehdyssä kosteuskartoituksessa havaittiin 90 prosentissa tapauksista jonkinasteisia kosteusteknisiä epäkohtia. Vuosina 1970–1994 valmistuneista 47 koulusta laajoja korjauksia vaatineita homeongelmia oli 13 prosentissa, joista puolet oli alapohjan ongelmia. Alapohjan kosteusvaurioita esiintyi eniten 1950-luvulla ja sitä ennen rakennetuissa kouluissa. (Hilden 1998)

Tutkituista kouluista laajimman ja vaikeimman ongelmakentän muodostivat 1950–60-luvulla kalliolle perustetut koulurakennukset, joiden alapohjasta osa oli toteutettu maanvaraisena ja osa ryömintätilaisena. Alapohjaan aiheutti kosteusrasitusta kalliopintaa pitkin valuvat, kalliopainanteisiin tai -syvennyksiin kertyvät pintavedet. Ryömintätilat olivat usein toteutettu tuulettumattomina ilman kulkuaukkoa tai ilmanvaihtoa, ja maanvaraisten osuukien alapuolinen täyttö ei joka kohdassa täytä sille asetettuja vaatimuksia esimerkiksi kapillaarisuuden suhteen. Joissain kohteissa myös salaojat ja sadevesiviemärit olivat

vaurioituneet. Kaikkien koulujen otannasta eniten esiintyi alapohjan kosteusvaurioita, joita ei kuntokartoituksessa ole aina edes mahdollista havaita. Korjaukset ovat myös usein melko vaikeita ja kalliita. (Hilden 1998)

### **2.1.3 Käytönaikainen kosteus**

Käytönaikaisia tyypillisimpiä kosteuslähteitä ovat muun muassa suihku, saunominen, tiskaus ja pyykkäys. Lisäksi ilmanvaihdon kautta tuleva ulkoilma tuo sisäilmaan vesihöyryä, jolloin myös sääolosuhteet vaikuttavat betonilaatan kosteusrasitukseen. Normaalista käytöstä ja elämisestä aiheutuva ilmankosteus ei aiheuta haittaa rakenteille, kunhan märkätilat on suunniteltu ja toteutettu vesitiiviisti.

### **2.1.4 Vesivahingot**

Vesivahingolla tarkoitetaan rakenteen äkillistä tai pitkällä aikavälillä tapahtuvaa kastumista yli kriittisen kosteuspitoisuuden. Jos kastumista ei huomata ja korjata ajoissa, homevaurion riski kasvaa.

Vuotovahingoista johtuvat korvausmäärät ovat melkein kaksinkertaistuneet 2000-luvulla; vuonna 2000 korvattiin vahinkoja noin 80 miljoonan euron edestä, kun vuonna 2012 yhteenlaskettu korvaussumma oli jo lähes 157 miljoonaa euroa. Vesivahingon yleisimmät syyt ovat vuotava viemäriputkisto (21 %) ja kylmä käyttövesi (18 %). Muita merkittäviä vahingonaiheuttajia ovat astianpesukone, lämmitysvesi, vesikalusteet, vesijohdot, ulkopuolisen veden tunkeutuminen sisälle, lämminvesivaraaja, kylmäkalusteet, sisäpuolinen sadevesiputkisto ja pesukone. Vuotovahingoista 87 % on ollut joko kokonaan tai osittain korvattavia. (Haapaniemi 2014)

## **2.2 Betonilaatan kuivuminen**

Betonilaatta kuivuu luontaisen diffuusion ja haihtumisen vaikutuksesta pyrkien tasapainokosteuteen ympäristönsä kanssa. Kuivumista voidaan nopeuttaa erilaisilla kuivatus- ja lämmitysmenetelmillä. Eri tekijöiden laskennallista vaikutusta kuivumisnopeuteen on kuvattu kuvassa 2.1.



**Taulukko 4.9** Likimääräinen aika lattiabetonin kuivattamiseksi 90 % suhteelliseen kosteuteen /3/. Suhteellinen kosteus tulee mitata ennen pinnoittamista. Taulukon kertoimet ovat ohjeelliset.

### PERUSTAPAUUS

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Betonin ilmamäärä normaali 2...4 %</li> <li>- Kovettumisaika 28 d ennen kuivumisajan alkua</li> <li>- Kuivuminen alaspäin estetty, laatta valettu maahan muovikalvon päälle</li> <li>- Jälkihoito muovikalvolla tai hyvällä jälkihoitoaineella</li> <li>- Betoniin ei saa joutua lisävetä (kastelu, sade ym.)</li> </ul>
<p>Perustapauksen kuivumisaika 60 d</p>	

### PERUSTAPAUKSESTA POIKKEAMINEN

Perustapauksesta poikkeavat rakenne, betonin laatuominaisuudet ja ympäristöolosuhteet otetaan huomioon kertomalla perustapauksen tarpeellinen kuivumisaika 60 d seuraavilla kehyksissä olevilla kertoimilla.										
Muuttuja	Kerroin									
Betonin laatu	Huokostamaton 1,0		Huokostus noin 10 % 0,5...0,6			Lujuus 25...35 MN/m <sup>2</sup> 1,0				
Ikä	Betonin ikä kuivatusta aloitettaessa		Laatan paksuus [mm]							
			< 150			≥ 150				
	1...2 viikkoa		0,7...0,8			1,0				
	3...4 viikkoa		0,9...1,0			1,0				
Kuivumis- olosuhteet	Suht. kosteus	20...50 % 1,0		60 % 1,2		80 % 1,5				
	Lämpötila	10 °C 1,4...1,3		20 °C 1,0		30 °C 0,7...0,6				
Laatan paksuus	h	60 0,4	80 0,7	100 1,0	120 1,4	140 1,8	160 2,3	200 3,3	300 [mm] 6,3	
Kuivuminen vain toiselta puolen Molemminpuolisessa kuivumisessa h = puoli laatan paksuutta										
Alapuolinen lämmöneriste	50 mm solumuovi 1,0...0,9		150 mm kevytsora 0,8...0,7			50 mm mineraalivilla 0,7...0,6				
Ei muovikalvoa betonin ja lämmöneristeen välissä										
Betonin koostumus	Suurin raekoko	18 mm 0,7			8 mm 1,0					
	Lentotuhka ja masuunikuona	1,0								
	Silika	K ≥ K35 1,5			K < K35 1,0					
	Notkeus	2...3 sVB 1,0		1...2 sVB 1,2		1...2 sVB 1,0		notkistaminen lisäaineella		

**Kuva 2.1.** Likimääräinen aika lattiabetonin kuivattamiseksi 90 % RH suhteelliseen kosteuteen. (By45/BLY7 2002)

Kuvassa esitetyillä kertoimilla voidaan laskea tutkimuksen kohteena olevan 120 mm paksun laatan (kerroin 1,4) laskennallinen kuivumisaika. Betoni on huokostamaton (1,0), betonin ikä kuivatusta aloitettaessa on kaksi viikkoa (0,8) ja ympäristön suhteellinen kosteus

on 20–50 % RH (1,0) ja lämpötila 25 °C (0,9). Alapuolinen lämmöneriste on solumuovia (1,0), suurin raekoko 16 mm (0,8), lujuusluokka C25/30 (1,0) ja notkeusluokka 3 (1,0). Laatan kuivuminen 90 % RH:in kestäisi siis  $1,4 \cdot 1,0 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,9 \cdot 1,0 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 60 = 40$  päivää. Kun lukemaan lisätään kahden viikon jälkihoitoaika, on laatan kuivumisaika valusta 54 päivää.

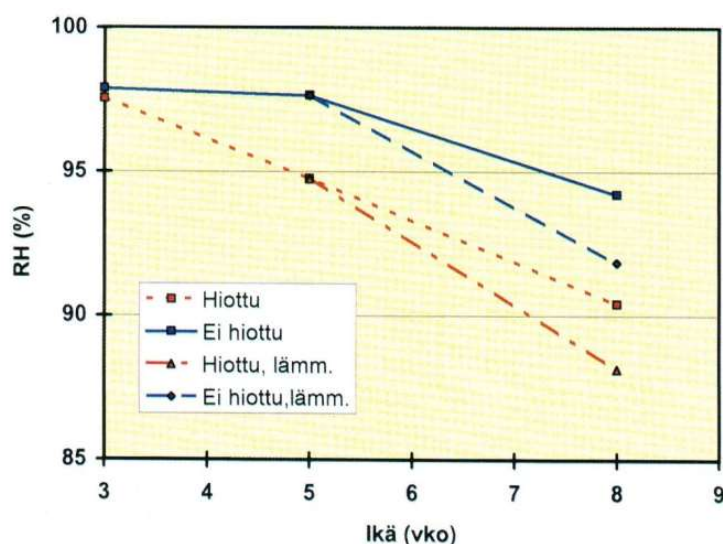
### 2.2.1 Kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden vaikutus

Ilmankosteus ja vallitseva lämpötila vaikuttavat betonilaatan kuivumisnopeuteen. Lämpimällä ilmalla on kylmää ilmaa parempi kyky sitoa itseensä vesihöyryä. Diffuusiota ajava voima kosteuden siirtymisessä on ilman absoluuttinen kosteus, eli toisin sanoen betoni kuivuu nopeammin talvella, kun ilmassa on vähemmän vesihöyryä. (Björkholtz 1997) Kylmää talvi-ilmaa lämmittämällä sen kosteudensitomiskykyä pystytään siis parantamaan ja kuivumista näin ollen nopeuttamaan.

Ilmasto-olosuhteilla on suuri vaikutus veden haihtumisnopeuteen. Jo 7 asteen muutos kuivuvan betonin sijainnin leveyspiirissä vaikuttaa veden poistumisnopeuteen jopa 25 %. (Abd El-Razek *et al.* 1999)

### 2.2.2 Kuivatusmenetelmien vaikutus

Betoni muodostaa lujittuessaan pinnalleen kalvon, joka hidastaa kosteuden haihtumista huoneilmaan. Pinnan hiomisella voidaankin nopeuttaa merkittävästi betonin kuivumista. (Merikallio 2002) Myös lattialämmitys vaikuttaa kuivumisaikaan. Hionnan ja lattialämmityksen vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 2.2.



**Kuva 2.2.** Lattialämmityksen ja hionnan vaikutus kuivumiseen. (Lumme *et al.* 1997)

Kuvasta nähdään, että hionnalla voidaan saavuttaa 1,5-kertainen kuivumisnopeus kuivumisaikan ollessa kahdeksan viikkoa. Lattialämmityksen vaikutus on 2–3 % RH.

Työvaiheessa betoni kannattaa suojata ulkopuoliselta kosteudelta. Erityistä huomiota tulee kiinnittää liitoskohtiin, kuten laatan ja ulkoseinään saumaan, sillä sinne kulkeutunut vesi haihtuu pois hyvin hitaasti. Rakentamisen aikaisia kosteusongelmia voidaan ehkäistä suojaamalla työmaalle tulevat materiaalit ja huputtamalla rakennus ennen yläpohjan valmistumista ja ovien ja ikkunoiden asennusta.

Vuonna 1999 tehdyssä tutkimuksessa tutkittiin radonin torjunnassa käytetyn rakennuspohjan tuuletusjärjestelmän vaikutusta alapohjalaatan kuivumisnopeuteen 11 kuukauden seurantajaksolla. Keskellä rakennusta kulki kokoojakanava, josta lähti halkaisijaltaan pienemmät imuputket. Tuuletusjärjestelmällinen betonilaatta kuivui 80 % RH suhteelliseen kosteuteen useita viikkoja ennen verrokkikohdetta, jossa vallitsi samat ympäristöolosuhteet. Mittausjakson aikana koneellisesti kuivatetusta alapohjasta poistui noin 2 300 kg vettä. (Kettunen *et al.* 2000)

### 2.2.3 Jälkihoitomenetelmien vaikutus

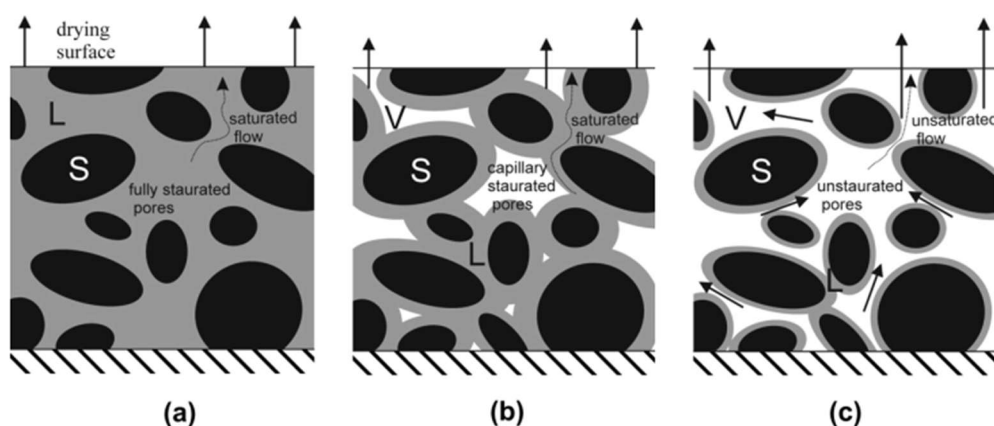
Betonin jälkihoidossa yleisesti käytetty vesisumutus ei hidasta merkittävästi betonilaatan kuivumista. Betonissa nousee vettä pintaan välittömästi valun jälkeen joka tapauksessa kapillaarisesti, jolloin kuivuminen on tasaista (ks. kohta 2.2.5). Mikäli jälkihoidossa käytetään ruiskutettavaa jälkihoitoainetta, pitää se mahdollisesti poistaa ennen pinnoitteen asennusta. Kun betonimassa suojataan peitteellä valun jälkeen, on veden haihtuminen suurilta osin estetty peitteen poistamisajankohtaan asti. Pidempiaikainen betonin peittäminen pidentää myös kuivumisaikaa peitteen poistamisen jälkeen. (By45/BLY7 2002) Ilman jälkihoitoa betonin lujuuskehitys jää vajaaksi, koska silloin osa betonimassassa olevasta sementistä jää kokonaan osallistumatta veden ja sementin väliseen hydrataatio-reaktioon. Liian nopea kuivuminen saattaa aiheuttaa myös pinnan halkeilua jo lujittumisvaiheessa. (Abd El-Razek *et al.* 1999)

### 2.2.4 Betonimassan ominaisuuksien vaikutus

Yksi betonilaatan kuivumiseen vaikuttava muuttuja on betonimassan koostumus ja sen sisältämät lisäaineet. Käyttämällä huokostavia lisäaineita saadaan betonin huokostilavuutta kasvatettua, jolloin vesihöyry pääsee kulkeutumaan ympäröivään ilmatilaan helpommin. Huokoistuksella on siis kuivumista nopeuttava vaikutus. Pienentämällä vesisementtisuhdetta saadaan minimoitua hydrataatioreaktioon osallistumattoman veden määrä, jolloin haihdutettavan veden vähäisempi määrä lyhentää kuivumisaikaa. Myös ki-viaineksen maksimiraekoon kasvatus nopeuttaa kuivumista. Betonimassan ominaisuuksien optimoinnilla voidaan kuivumisnopeus kasvattaa 2–10-kertaiseksi. (By45/BLY7 2002) Ominaisuuksien optimoinnissa ja lisäaineiden käytössä tulee kuitenkin ottaa huomioon vaikutukset myös muihin ominaisuuksiin, kuten betonin lujuuteen ja pakkasenkestävyyteen.

## 2.2.5 Laatan paksuuden vaikutus

Laatan paksuuden vaikutus kuivumisaikaan on eksponentiaalinen. Betonin kuivuminen hidastuu ajan myötä, kun kauempana betonin pinnasta olevalla vesihöyryllä kestää kauemmin saavuttaa betonin pinta. Valusta seuraavan kymmenen tunnin aikana veden haihtumisnopeus on suurin piirtein vakio; veden jatkuva kapillaarinen nousu betonin pintaan aiheuttaa haihtumisnopeuden, joka on lähes yhtä suuri kuin vastaavissa ympäristöolosuhteissa olevan avoimen vesiastian. Kuivuminen alkaa hidastua, kun betonin kapillaarihuokosissa oleva vesimäärä ei enää mahdollista jatkuvaa kapillaarista nousua. Kuvassa 2.3 on esitetty kuivumisen eri vaiheet. Selitteistä S tarkoittaa kiinteää (solid), L nestemäistä (liquid) ja V kaasumaista olomuotoa (vapor). (Bakshi *et al.* 2011)



**Kuva 2.3.** Betonin kuivumisen eri vaiheet: (a) täysin vedellä kyllästynyt tuore betoni (b) jatkuva kapillaarinen nousu (c) hygroskooppinen vaihe (kuivuminen vain haihtumalla). (Bakshi *et al.* 2011)

Paksuuden kaksinkertaistuessa kuivumisaika pitenee 2–4-kertaiseksi. Betoniyhdistyksen ja Betonilattiayhdistyksen ohjeessa esitetyn karkean laskentatavan mukaan kuivumisaika kasvaa tässä tapauksessa 3,0–3,5-kertaiseksi. Laatan kuivumisella kahteen suuntaan yhden suunnan sijaan on sama vaikutus kuin laatan paksuuden puolittamisella. (By45/BLY7 2002)

## 2.2.6 Pinnoitteiden vaikutus vaadittuun kosteuspitoisuuteen

Pinnoitemateriaali asettaa betonin kosteuspitoisuudelle raja-arvon, niin sanotun kriittisen kosteuspitoisuuden, joka sen tulee alittaa ennen pinnoitteen asentamista. Eri pinnoitteiden kriittiset suhteelliset kosteudet on listattu kuvassa 2.4.

Betonin suhteellisen kosteuden (RH) enimmäisarvo, %	Päällyste	Huomautuksia
<b>80</b> Betonin pintaosien (2...3 cm) oltava alle 75 %	– Mosaiikkiparketti <sup>1)</sup>	Kosteusliikkeet Puulajikohtainen (esim. pyökki 80 %, tammi 85 %)
<b>85</b>	– Lautaparketit <sup>2)</sup> – Huopa- tai solumuovipohjaiset muovimatot – Kumimatot – Korkkilaatat, laattojen alapinnassa kosteudeneristys (muovikalvo) – Tekstiilimatot, joissa on alusrakenne (kumi, PVC, kumilateksisively) – Luonnonmateriaalista tehdyt tekstiilimatot ilman alusrakennetta	Betonin pintaosat alle 75 % RH  Bakteeritoiminta, sienikasvu, vesiliukoisten liimojen kosteuden kestättömyys
<b>90</b>	– Muovilaatat – Muovimatot ilman huopa- tai solumuovipohjaa <sup>3)</sup> – Linoleum  – Alustaan kiinnittämättömät puulattiat (lautaparketit) <sup>2)</sup> , puun ja betonin välissä kosteudeneristys ja sen alla kosteuden poistokanavointi  – Polyuretaanimuovimassat – Täyssynteettiset tekstiilimatot ilman alusrakennetta (erikoistapauksissa suht. kosteus <97%)  – Keraaminen laatoitus	Kosteus voi aiheuttaa päällysteseen muutoksia. Käytettävän liiman on kestättävä kyseinen kosteus (valmistajan ohjeet!). Vesiliukoista liimaa käytettäessä yleinen kosteusraja on 85 %.  Parketin alla esimerkiksi melko tiivis korkkiraematto saumat teipattuina. Seinustoilla maton päällä muovikaista, jonka reunat käännetään seinille. Jalkalistoissa uritus kosteuden poisjohtamista varten.  Märissä tiloissa sekä betonin kosteuden ollessa suuri (>90%) mattojen kiinnitykseen on käytettävä vedenpitävää liimaa ja riittävän runsaalla liimamäärällä varmistettava saumojen pitävyys  Betonin kutistumat (laattojen tartunta) <sup>5)</sup>
<b>97</b>	– Epoksi-, akryyli- ja polyestermuovimassat <sup>4)</sup>  – Sementtipolymeeripinnoitteet	Betonin pinnan on oltava muovimassaa levitettäessä kuiva sekä riittävän lämmin, muussa tapauksessa pinta on kuivattava välittömästi ennen massan levitystä esim. säteilylämmityksellä kovettumisen ja tartunnan varmistamiseksi  Betonin pinta kostea mutta ei irtovettä. Huom. valmistajan ohjeet!

**Kuva 2.4.** Päällystystyön edellytyksenä oleva betonin suhteellisen kosteuden enimmäisarvo. (By45/BLY7 2002)

Taulukosta nähdään, että puiset pinnoitteet vaativat yleensä pienemmän kosteuspitoisuuden ennen asennusta moneen muuhun pinnoinnointimateriaaliin verrattuna. Pinnoitteen asennettavuuteen vaikuttavat tekijät ovat materiaalin vesihöyrynläpäisevyys ja herkkyys home-, sieni- ja bakteerikasvustoille. Ensin mainitusta syystä tiiviit muovipinnoitteet vaativat pienemmän kosteuspitoisuuden ennen asennusta huokoisiin massapinnoitteisiin verrattuna.

Betonilaatta kuivuu pinnastaan nopeammin kuin syvältä, minkä johdosta laatan kosteuspitoisuus pinnalla on huomattavasti pienempi, usein lähellä samaa tasoa kuin huoneilman suhteellinen kosteus. Pinnoitteen asentamisen jälkeen kosteuspitoisuus kuitenkin tasaantuu ajan myötä yhtä suureksi koko laatan poikkileikkauksen alalla. (Leivo *et al.* 2009)

### 2.2.7 Alusrakenteen vaikutus

Veden kapillaarinen nousu alapohjan alapintaan tulee rakennusmääräysten mukaan estää kapillaarikatkokerroksella, joka on yleensä 300 mm paksu kerros karkeaa soraa tai sepe-liä. Laatan ja lämmöneristeen alla olevan maakerroksen huokosilman suhteellinen kosteus on tyypillisesti hyvin lähellä 100 % RH kaikkina vuodenaikoina (Leivo *et al.* 2004). Absoluuttisen kosteuden ollessa kuitenkin diffuusiota ajava voima, pystytään alapohjan riittävällä lämmöneristyksellä estämään maakerroksen liian suuresta vesihöyrypitoisuudesta johtuva kosteuden siirtyminen alapohjan läpi kohti huoneilmaa, sillä huokosilman vesihöyrypitoisuus pienenee jäähtymisen seurauksena. Käytettäessä kovaa lämmöneristettä, kuten EPS:ää, saadaan alapuolisen maan jäähdyttämisen lisäksi parannettua alapohjan vesihöyrytiiviyyttä. (Leivo *et al.* 2008) Lämpötilaeron huoneilman ja alapuolisen maakerroksen välillä tulisi olla vähintään 2...3 °C (Harderup 1991).

Eristämättömän alapohjarakenteen alapuolinen maakerros on lähellä sisäilman lämpötilaa ympäri vuoden. Tämä johtaa suureen diffuusion virtausnopeuteen maaperästä kohti huoneilmaa. Tällöin pinnoitteen alla oleva suhteellinen kosteus ei tyypillisissä Suomen maaperän lämpötiloissa laske ikinä alle 85 % RH:n huoneilman suhteellisen kosteuden ollessa noin 50 % RH. Tästä syystä eristämättömän betonilaatan yläpinnassa ei voi kosteusturvallisesti käyttää vesihöyrytiivistä pinnoitetta. (Leivo *et al.* 2008)

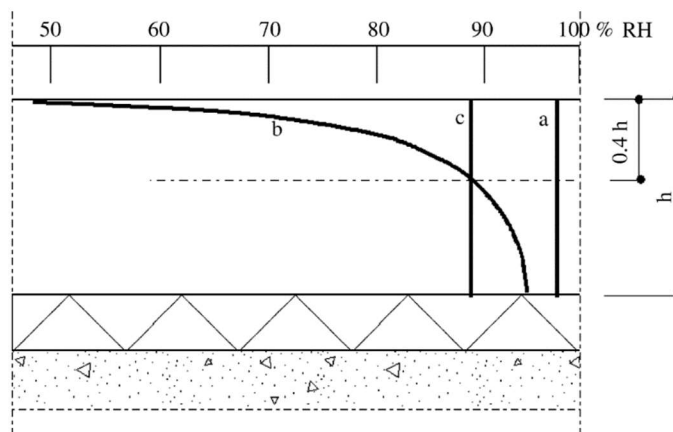
## 2.3 Kosteuden mittaaminen

Tarkkoja menetelmiä betonin kosteuspitoisuuden valinnalle ovat huolellisesti suoritettuina porareikämittaus ja näytepalamittaus. Suomessa käytettäviä epätarkkoja, suuntaa antavia menetelmiä ovat pintakosteusilmaisin, mittaus putkittamattomasta reiästä, porareikämittaus toistuvasti samasta mittausreiästä, mittaus valuun asennetusta mittausputkesta, mittaaminen pian poraamisen jälkeen, mittaaminen jatkuvasti betonin sisällä olevalla anturilla, porareikämittaus suosituslämpötila-alueen ulkopuolella, näytepalamittaus asentamatta mittapäätä välittömästi mittausputkeen ja näytepalamittaus normaalia pienemmällä näytemäärällä tai epätarkalla syvyydellä. (RT 14-10984 2010) Ulkomailla käytettäviä menetelmiä ovat koepinnoitus, kosteuden sitoutumiskoe ja veden haihtumisnopeuden mittaus (Leivo *et al.* 2009). Mittausajankohdan hetkellä vallitsevat olosuhteet tulee dokumentoida mittaustavasta riippumatta (RT 14-10984 2010).

### 2.3.1 Porareikämittaus

Porareikämittauksessa porataan betonilaattaan ensin reikä halutulle mittaussyvyydelle millimetrin tarkkuudella. Reikä putkitetaan, ja putken yläpää sekä yhtymäkohta laattaan tiivistetään, jotta poikkileikkauksen ylempien osien tai huoneilman kosteuspitoisuus ei vaikuttaisi mittaustulokseen. Mikäli mittausta suoritetaan lattialämmityksen vaikutusalueella, tulee lämmitys katkaista viimeistään viikkoa ennen mittauksen suoritusta, jottei laatan ja sisäilman välinen lämpötilaero aiheuta mittaukseen epätarkkuutta. Putken yläpäähän asennetaan ilmatiiviisti mittaustulokkeen mittauspäätä yleensä kolmen vuorokauden kuluttua reiän poraamisesta. Tässä ajassa itse poraamisen mittaustarkkuutta heikentävät vaikutukset ehtivät häviämään ja reiässä oleva ilma saavuttaa tasapainokosteuden, jolloin saadut mittaustulokset ovat riittävän tarkkoja. (RT 14-10984 2010)

Suosittelun syvyys porareikämittauksen suorittamiselle on 40 % laatan paksuudesta, eli esimerkiksi 100 mm paksuisesta laatasta mittausta kannattaa suorittaa 40 mm syvyydeltä. Kuivuvan, pinnoittamattoman betonilaatan kosteuspitoisuus tällä syvyydellä vastaa tasaa suhteellista kosteutta, joka laattaan syntyy pinnoituksen jälkeen. (Leivo *et al.* 2009) Laatan kosteuskäyrä kuivumisen eri vaiheissa on esitetty kuvassa 2.5.



**Kuva 2.5.** Laatan kosteuskäyrä (a) välittömästi valun jälkeen (b) ennen pinnoitusta (c) pinnoituksen jälkeen kosteuspitoisuuden tasaannuttua. (Leivo *et al.* 2009)

Kuvasta nähdään, että välittömästi valun jälkeen (käyrä a) suhteellinen kosteus on hyvin lähellä 100 % RH. Kuivumisen seurauksena yläpinnan kosteuspitoisuus pienenee huomattavasti syvempiä osia pienemmäksi (käyrä b). Pinnoituksen jälkeen kosteus tasaantuu hitaasti. Pinnoituksen jälkeistä tasapainotilaa vastaava käyrä c leikkaa käyrän b korkeudella  $0,4h$ , jossa  $h$  on laatan paksuus.

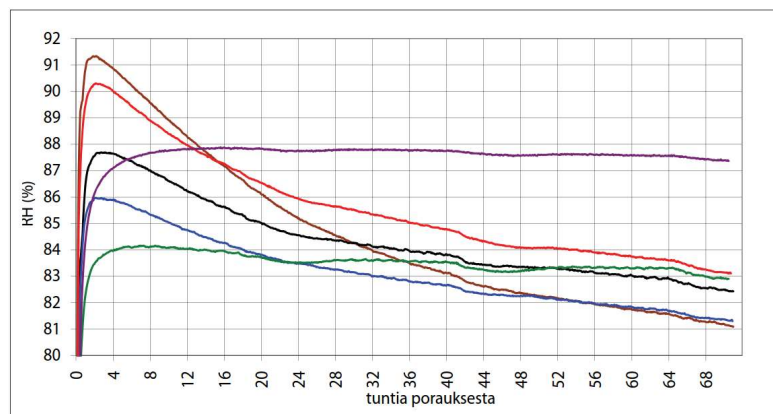
Suosituslämpötila-alue tarkan mittaustuloksen saamiseksi porareikämittauksella on  $+15...+25\text{ °C}$ . Betonin ominaisuudet vaihtelevat, jolloin eri lämpötiloissa saadut mittaustulokset eivät välttämättä ole keskenään vertailukelpoisia eikä niitä pysty edes luotettavasti muuntamaan vastaamaan oikeita käyttöolosuhteita vastaavaa lämpötilaa. Nyrkkisääntö on, että korkeammassa lämpötilassa kosteustutkimuksen tulokset ovat suuremmat

ja alhaisessa lämpötilassa pienemmät. Suhteellisen kosteuden muutos jokaista astetta kohti on kuitenkin voimakkaasti riippuvainen betonin ominaisuuksista, jolloin vakioituneen laskentatavan käyttäminen suosituslämpötila-alueen ulkopuolella antaa vain karkeita tuloksia. Huoneilman jäähtyessä rakennetta kylmempi mittausanturi antaa ensin korkeampia suhteellisen kosteuden arvoja, mutta rakenteen jäähtyttyä alenee taas vastaamaan paremmin todellista arvoa. (RT 14-10984 2010)

Mitattaessa betonin kosteuspitoisuutta putkittamattomasta reiästä saadaan epämääräinen keskiarvo koko poraussyvyydeltä eikä suinkaan tarkkaa arvoa halutulta syvyydeltä. Tilanne on sama, jos käytetään putkea, joka ei ole umpinainen koko mitaussyvyyden matkalta. Tällä menetelmällä syntyvät suurimmat mittausvirheet, jos mitataan pinnaltaan määrän tai tehokuivatun betonilaatan kosteutta. (RT 14-10984 2010)

Kun porareikämittaus suoritetaan toistuvasti samasta reiästä, mittausvirhettä aiheuttavat putkien tiivistyksen peittäminen, putken ja betonin rajapinnasta tapahtuva todellista nopeampi betonin kuivuminen, mittauskohtaan imeytynyt lattiapinnalle päässyt vesi ja olosuhdevaihtelujen vuoksi putkeen ajoittain tiivistyvä kosteus. Mittaustarkkuutta saa parannettua pidentämällä mittausanturin tasaantumisaikaa kunkin mittauskerran jälkeen, jolloin mittausputken ympäristön muuta laattaa nopeampi kuivumisnopeus ei haitallisissa määrin heikennä mittautulosta. Tarkan mittautuloksen saamiseksi paras tapa mitata on kuitenkin aina uusi porareikä. (RT 14-10984 2010)

Mitattaessa, esimerkiksi aikataulusyistä, heti porauksen jälkeen antaa kosteusmittari yleensä todellista suuremmat suhteellisen kosteuden arvot. Porareian kosteuspitoisuuden kehitys on esitetty kuvassa 2.6.



**Kuva 2.6.** Porareian suhteellisen kosteuden (RH) kehittyminen ajan funktiona porauksen jälkeen. (Merikallio 2009)

Kosteuden haihtuminen on siis voimakkainta ensimmäisen 24 tunnin aikana. 72 tunnin jälkeen mittautulos on jo hyvin luotettava. Mittauksiin välittömästi poraamisen jälkeen onkin otettava käyttöön suuri varmuuskerroin. (RT 14-10984 2010)



### 2.3.2 Näytepalamittaus

Näytepalamittaus on yleisesti käytetyistä kosteudenmittausmenetelmistä tarkin. Sen luotettava mittaustilaväli on  $-20...+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , eikä sen tarkkuuteen vaikuta olosuhteiden epävakaus. Tuloksen saa myös melko nopeasti näytteenoton jälkeen. (RT 14-10984 2010)

Näytepalamittauksessa porataan betoniin kuoppa haluttua mittaussyvyyyttä 5 mm korkeammalle tasolle. Kuopan pohjalta otetaan lyöntimeisselillä, taltalla tai piikkausvasaralla näytekappaleita, joiden koko on suurimmaksi osaksi vähintään 5 mm x 5 mm x 5 mm. Näytteet kerätään koeputkeen, jonka päähän asennetaan välittömästi suhteellista kosteutta mittaava ilmatiivis anturi. Parhaan mittaustarkkuuden saavuttamiseksi kultakin näytteenottosyvyydeltä otetaan kaksi koeputkellista näytettä, jolloin koeputken rajallinen betonimäärä verrattuna mittaussyvyydellä vallitsevaan tilanteeseen ei heikennä mittaustarkkuutta. Näytekappaleita tulee olla vähintään yksi kolmasosa putken tilavuudesta, jotta betonin suhteellinen kosteus varmasti tasapainottuu putken ilmatilaan ja mittaustulos on näin ollen todellisuutta vastaava. Lukemienottolämpötilan tulee olla  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  tarkkuudella betonirakenteen normaali käyttölämpötila, jolloin tulokseksi saadaan mitattavan betonin suhteellinen kosteus kyseisessä lämpötilassa. (RT 14-10984 2010)

Jos mittapäättä ei ole mahdollista asentaa koeputkeen välittömästi näytteenoton jälkeen, tulee näytekappaleiden tilavuutta suhteessa koeputkeen kasvattaa ja kansi sulkea ilmatiiviisti. Tällä menettelyllä varmistetaan, että näytekappaleissa oleva kosteus riittää tuottamaan koeputken ilmatilaan todellista betonin kosteuspitoisuutta vastaavan tasapainokosteuden myös mittapään asentamisen jälkeen. (RT 14-10984 2010) Poistettaessa ilmatiivis kansi ennen mittapään asennusta koeputkessa oleva ilma tasapainottuu ympäristön ilmastokosteuden kanssa.

Suoritettaessa näytepalamittaus pienemmällä näytemäärällä käytetään vastaavasti myös pienempää koeputkea. Huolellisesti suoritettuna tälläkin menetelmällä saa varsin luotettavia tuloksia, mutta pienikin virhe putken tiivistyksessä aiheuttaa sen, ettei betonin huokosissa oleva kosteus riitä tuottamaan koeputken ilmatilaan rakenteessa mittaussyvyydellä vallinnutta suhteellista kosteutta, jolloin saatu tulos on merkittävästi todellista arvoa pienempi. (RT 14-10984 2010)

Hyvin pienestä näytteenottokuopasta otettujen näytekappaleiden sekaan voi joutua betonia näytekuopan työstöpinnasta, jolloin mittaustuloksiin saattaa vaikuttaa tyypillisesti porareikämittaukseen liittyvä kuivuminen, kun poistetun betonin kosteutta siirtyy mitattavaan materiaaliin. Mittaustulos saattaa olla myös todellista pienempi, mikäli kuopan reuna on kuivunut työstön seurauksena. (RT 14-10984 2010)

Jos näytteenotto suoritetaan epätasaisesti syvyydeltä, saadaan tulokseksi epämääräinen keskiarvo koko näytteenottosyvyydeltä. Ongelma on siis pohjimmiltaan sama, kuin porareikämittauksessa putkittamattomasta reiästä. (RT 14-10984 2010) Betonirakenteen

kosteusjakauma korkeussuunnassa saattaa olla hyvinkin epätasaisesti jakautunut, jolloin mittaustuloksesta ei pysty päättämään oikein mitään.

### 2.3.3 Pintakosteusilmaisin

Pintakosteusilmaisin mittaa vain materiaalin sähköisiä ominaisuuksia, joista päätellään pinnan kosteuspitoisuus. Mittaustulokseen vaikuttaa kosteuden lisäksi pinnan suolakerrostumat, teräkset, materiaalin koostumus ja rakenteiden pintaosien vaihtelu. Mittaustarkkuus on pintakosteusilmaisimella erittäin alhainen, mutta sillä pystyy seuraamaan suhteellisen kosteuden muuttumista tai saman rakenteen eri kohtien kosteuseroja. (RT 14-10984 2010) Mittaustuloksia hyödyntäessä tulee ainakin käyttää hyvin suuria varmuuskertoimia. Esimerkiksi Britannian rakennusmääräysten mukaan pinnan suhteellisen kosteuden tulee olla korkeintaan 75 % RH ennen pinnoitteen asennusta (Leivo *et al.* 2009).

### 2.3.4 Mittaus valuun asennetusta putkesta

Mitattaessa kosteutta valuun kiinteästi asennetuista putkista rakenteessa olevien johtojen ja putkien sijaintia ei tarvitse selvittää. Epätarkkuutta aiheuttavia tekijöitä menetelmässä ovat epätarkempi mittaussyvyys ja putken tiivistysten heikentyminen pitkällä aikavälillä. Putki täytetään mittausten välillä tyypillisesti lämmöneristeellä tai muulla tiiviillä materiaalilla olosuhdevaihtelujen aiheuttaman kosteuden tiivistymisen estämiseksi. Suurimpia riskejä ovat putken juureen tiivistyvä vesi ja se, ettei valuvaiheessa välttämättä vielä tiedetä oikeaa mittaushaikaa. Mittaustarkkuus paranee, jos putken pohjalta porataan pois 2 mm sementtiliimaa vähintään kolme vuorokautta ennen mittauksia, kunhan asia on huomioitu mittaasputken asennussyvytydessä. Huolellisesti suoritettuna valuun asennetulla putkella on mahdollista päästä lähes samaan tarkkuuteen kuin porareikämittauksella. Mitatapaan tasaantumisaikaa tulee pidentää, mikäli samasta putkesta tehdään useampi mittaus. (RT 14-10984 2010)

### 2.3.5 Mittaaminen jatkuvasti betonin sisällä olevalla anturilla

Mittaus voidaan suorittaa myös hyvin pienellä, kovettuneeseen betoniin porattuun reikään asennetulla mittalaitteella. Mittaustavalla saavutetaan riittävä tarkkuus, mikäli laite on kalibroitu ennen asennusta ja sen näytämät arvot eivät muutu merkittävästi betonin ainesosien vaikutuksesta. Lämpötilavaihtelujen vaikutus mittaustuloksiin voidaan minimoida asentamalla lämmöneristetty mittaasputken yläosaan. Mikäli mittalaitteisto on kalibroitu myös mittausten jälkeen, on menetelmällä mahdollista saada tarkkojakin mittaustuloksia. (RT 14-10984 2010) Mittausten jälkeen suoritettuna kalibroinnin ansiosta voidaan loppupään mittaustulokset korjata vastaamaan todellisia arvoja.

### 2.3.6 Koepinnoitus

Yhdysvalloissa käytetyssä mittausmenetelmässä kostean betonin päälle asennetaan kosteutta läpäisemätön pinnoite, joka voi olla myös sama kuin lopullinen pinnoite, osalle lattiapinta-alaa. Pinnoitteen annetaan olla paikallaan yleensä kolme vuorokautta, jonka jälkeen laatan ja pinnoitteen rajapinnan kosteus mitataan. Menetelmän tarkkuutta heikentää se, että kosteuden jakaantumiseen tasaisesti poikkileikkauksen läpi menee tyypillisesti 2–3 kuukautta pinnoitteen asentamisen jälkeen. Raja-arvona pinnoitteen lopulliselle asennukselle on yleensä 80 % RH. (Leivo *et al.* 2009)

### 2.3.7 Kosteuden sitoutumiskoe

Kosteuden sitoutumiskokeessa betoni peitetään mattopeitteellä, jonka alle asennetaan kaksi liimapintaista nauhaa, joista ensimmäinen on veteen liukeneva ja toinen lateksinen, vettä kestävä liimapinta. Kolmen vuorokauden jälkeen matto poistetaan ja liimanauhat tutkitaan. Mikäli maton ja betonin rajapinnassa on liikaa kosteutta, on ensimmäinen nauha osittain tai kokonaan liuennut ja toinen menettänyt liimapintaansa. Yhdysvalloissa käytetyssä menetelmässä havainnot perustuvat todellisissa olosuhteissa tehtyihin havaintoihin käyttäen lopullisen rakenteen pinnoitetta. Mittaustavassa on kuitenkin sama ongelma kuin koepinnoituksessa, sillä kolme vuorokautta ei riitä kosteuden tasaiseen jakaantumiseen koko poikkileikkauksen alalle, jolloin laatan ja mattopeitteen rajapinnassa vallitseva kosteus on todellista tilannetta pienempi. Menetelmä ei myöskään toimi liian kosteassa ilmassa, josta liimapintoihin sitoutuvalla vedellä on sama vaikutus liimapintoihin kuin betonista nousevalla kosteudella. (Leivo *et al.* 2009)

### 2.3.8 Veden haihtumisnopeuden mittaus

Yksi Yhdysvalloissa käytetyistä mittausmenetelmistä on mitata veden haihtumisnopeutta laatan pinnasta. Sallittu haihtumisnopeus ennen pinnoitteen asennusta on valmistajasta riippuen 44 tai 75 g/m<sup>2</sup>/24h. Laatan kosteusjakauman ollessa kuitenkin epätasainen, saattaa veden haihtumisnopeus pinnasta alittaa vaaditun rajan ennen kuin ylimääräinen kosteus on poistunut laatan alemmista osista. (Leivo *et al.* 2009)

## 2.4 Kosteuden aiheuttamat home- ja sisäilmaongelmat

Kosteusvaurion kokeneissa rakenteissa kasvaa homesukuja, hiivoja ja sädesieniä, joita ei terveissä rakenteissa tavata. 1990-luvun lopulla julkaistussa suomalaisessa tutkimuksessa 133 oppilaan otannasta (99 ongelmakouluissa, 34 kontrollia) yhdeksän sairasti astmaa, joista kahdeksan opiskeli homekoulussa. (Taskinen *et al.* 1998) Samoihin aikoihin julkaistun norjalaistutkimuksen mukaan astman riski on kaksinkertainen kosteusvaurioituneissa rakennuksissa asuvilla terveissä taloissa asuviin verrattuna (Munir *et al.* 1997),

joten tuloksissa ei ole suurta eroa tutkittaessa kodin tai koulun sisäilman vaikutuksia. Homebakteerit ja mykobakteerit voivat aiheuttaa hengityselinten sairauksia, jotka voivat aiheuttaa terveyshaittoja (Hirvonen *et al.* 2000). Arviolta 20 % koululaisista voi saada terveyshaittoja koulujen kosteus- ja homeongelmista (Loikkanen *et al.* 1997).

Toisessa suomalaistutkimuksessa selvitettiin toisistaan erillään keskisuomalaisen kaupungin koulukiinteistöissä esiintyvät kosteusvauriot ja ilmassa ja pinnoilla olevat mikrobipitoisuudet. Lisäksi oppilaille toteutettiin oirekysely 12 kuukauden seurantajaksolla. Suurimmat mikrobipitoisuudet todettiin tiloissa, joissa oli havaittu myös kosteusvaurio. Seurantajaksolla kosteusvaurion kokeneiden koulujen oppilailla oli enemmän kurkkuoireita, nenäverenvuotoa, kuumeilua, väsymystä, päänsärkyä ja keskittymisvaikeuksia verrokkeihin verrattuna. (Meklin *et al.* 1998)

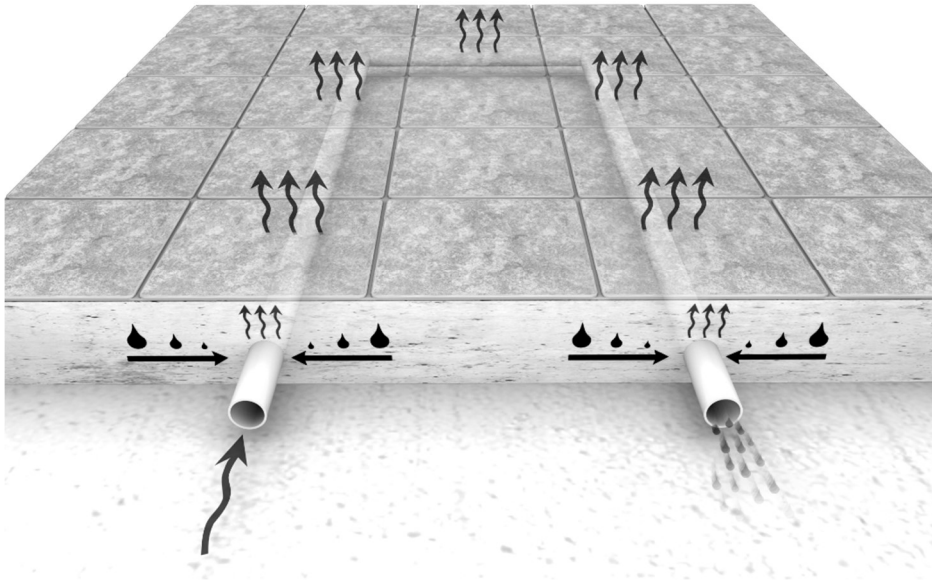
Interventiotutkimuksessa tutkittiin homekorjausten vaikutusta oppilaiden kokemiin hengitystieoireisiin. Lähtötilanteessa kosteusvaurioituneiden koulujen oppilaista 40 % valitti hengitystieoireista, joka oli kaksinkertainen osuus terveeseen kouluun verrattuna. Oireet vähenivät merkittävästi korjaustoimenpiteiden jälkeen. (Meklin *et al.* 2000)

Otettaessa pienimmätkin vauriot huomioon, kosteusvaurioita esiintyi 92 %:ssa astmalasten ja 83 %:ssa ei-astmatikkosten kodeista. Näkyvää homekasvustoa oli astmaa sairastavien kodeista 52 %:ssa, kun verrokkiryhmällä sitä esiintyi 38 %:ssa. Suurin merkitys näytti kuitenkin olevan lasten omasta makuuhuoneesta saaduilla mittauksilla, sillä astmapausten makuuhuoneista 28 %:ssa oli kosteusvaurioita, kun terveiden lasten huoneissa vastaava luku oli 6 %. (Hyvärinen *et al.* 1999)

Sandwich-elementin reunaosissa esiintyneellä voimakkaalla aktinobakteeri- eli sädesienikasvulla on voimakas vaikutus rakennuksen sisäilmaan. Muilla bakteereilla ja sienillä ei ole havaittu vastaavaa vaikutusta. Ulkoseinän aktinobakteeripitoisuuden kymmenkertaistessa sisäilman mikrobipitoisuus 1,2-kertaistuu. Talvella itiöpitoisuus pienenee sisäilman kuivuessa, sillä ilmakehän kosteus vaikuttaa itiöiden kokoon, elävyyteen ja kykyyn lähteä kasvuun. Sisäilman mikrobipitoisuus kasvaa, mikäli korvausilma pääsee tulemaan seinärakenteen läpi. Tiiviimpi seinärakenne siis rajoittaa mikrobien pääsyä sisäilmaan. Homekasvu on yleensä voimakkaimmillaan elementin halkeamakohtissa, joista ulkopuolinen kosteus pääsee eristetilaan. (Pessi *et al.* 2000) Toinen riski elementtiseinässä on elementtien puutteellisesta saumauksesta aiheutunut vesivuoto (Torikka 1999).

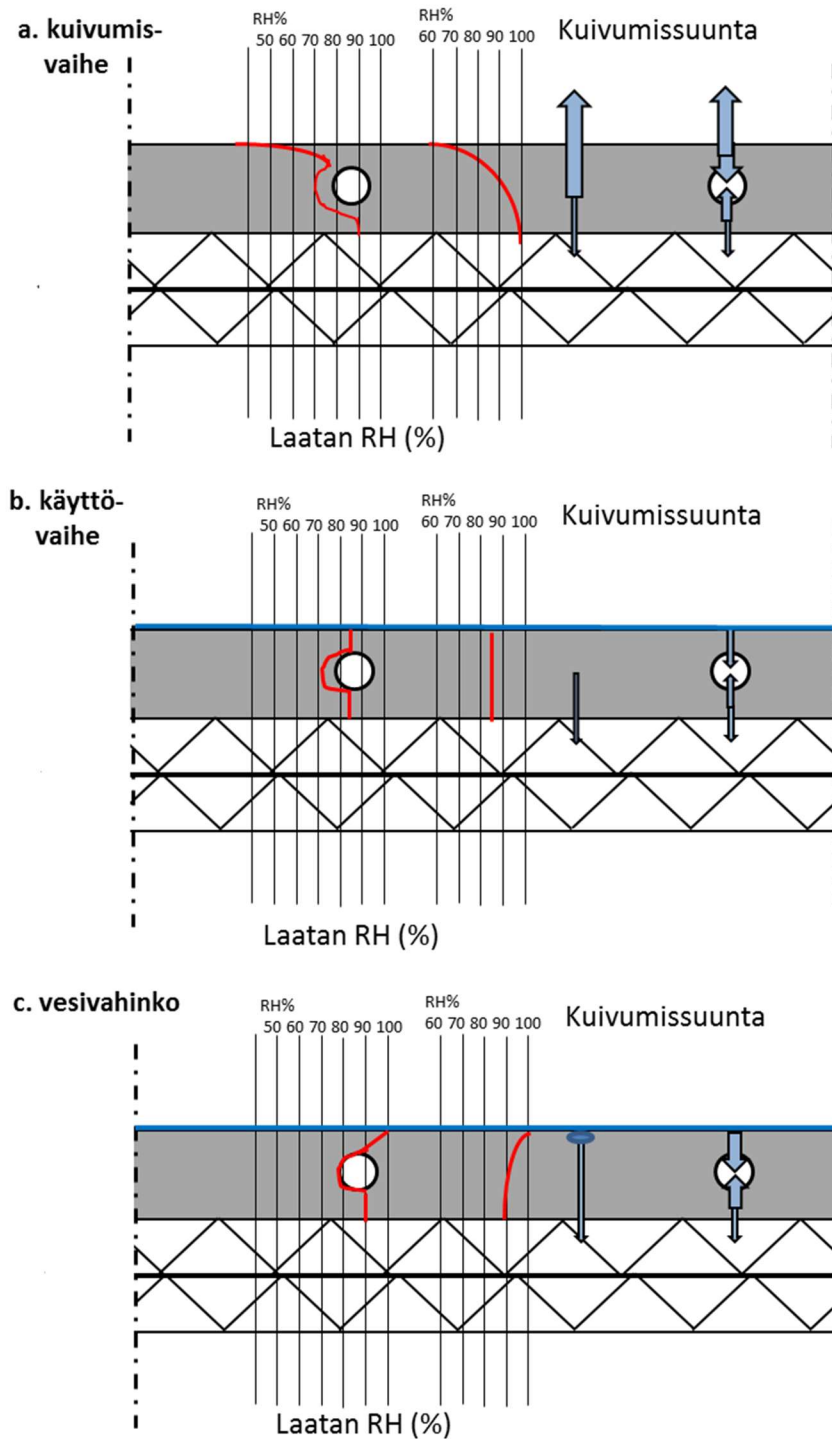
## 2.5 Tulilattian toimintaperiaate

Tulilattia-järjestelmän kuivattava vaikutus perustuu betonilaatan sisällä kiertävään ilmakehään lämmitysputkistoon (kuva 2.7). Putket on rei'itetty, jolloin kosteuden on mahdollista siirtyä laatasta putkissa kiertävään lämmitysilmään. (Lehtimäki *et al.* 2015)



**Kuva 2.7.** Tulilattia-putkiston toimintaperiaate. Vasemmalla näkyy lämmin kuiva me-noilma ja oikealla viileämpi kostea paluuilma. (Lehtimäki et al. 2015)

Kosteusjakauma putkien ympäristössä poikkeaa muusta betonilaatasta (kuva 2.8). Putket on kääritty ilmanläpäisevään kankaaseen, jotta betoni ei pääse valuvaiheessa tunkeutumaan putken sisään. Lämmönlähteenä voi toimia lähes mikä tahansa lämmitysmuoto, kuten lämpöpumppu, suora sähkö, kaukolämpö tai takka. Järjestelmä nopeuttaa laatan kuivumista pinnoituskuivuuteen työmaa-aikana ja mahdollistaa kosteusvaurion kuivattamisen käytön aikana putkiston kautta. (Lehtimäki et al. 2015)



**Kuva 2.8.** Laatan periaatteellinen kosteusk jakauma punaisella ja kosteuden siirtymissuunta sinisellä eri tilanteissa. Putken ympäristössä vallitsee selvästi pienempi kosteuspitoisuus verrattuna muuhun laattaan. (Leivo 2015)

Putkistossa olevan ilman kosteutta seurataan reaaliaikaisesti, jolloin mahdolliset vesivahingot on mahdollista havaita hyvissä ajoin ennen rakenteen vaurioitumista. Kosteuslähde on mahdollista rajata lämmityspiirin tarkkuudella. Kosteusanturit sijaitsevat puhallinyksikössä, jolloin ne on mahdollista vaihtaa ja kalibroida käytön aikana. (Lehtimäki *et al.* 2015)

## 2.6 Kosteuden siirtymisen laskennallinen tarkastelu

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna merkitään symbolilla  $\delta_v$  (m<sup>2</sup>/s). Kun tiedetään rakennekerroksen paksuus  $d$  (m), voidaan materiaalin vesihöyrynvastus (s/m) laskea kaavalla

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (2.1)$$

Kosteusvirta materiaalikerroksen läpi (kg/m<sup>2</sup>s) lasketaan kaavalla

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_v} \quad (2.2)$$

Missä  $v_1$  on kosteuspitoisuus (kg/m<sup>3</sup>) materiaalikerroksen sisäpuolella ja  $v_2$  kosteuspitoisuus ulkopuolella. Materiaalin vesihöyrynläpäisykerroin (m/s) on vesihöyrynvastuksen käänteisluku

$$W_v = \frac{1}{Z_v} \quad (2.3)$$

jolloin kaava (2) muuntuu muotoon

$$g = W_v(v_1 - v_2) \quad (2.4)$$

Rakennekerroksen kuivuminen on jaettavissa kolmeen vaiheeseen. Vaiheessa 1 rakenteen kosteuspitoisuus on kapillaarisella alueella, jolloin kosteus poistuu kapillaarivirtauksen, pintadiffuusion ja diffuusion avulla. Kuivumisnopeus riippuu lähes täysin kosteuden haihtumisesta pinnasta ilmaan. Kuivumiskäyttäytyminen on tyypillinen tuoreelle betonille välittömästi valun jälkeen, ja se kestää yleensä muutamasta tunnista muutamaan päivään (kappale 2.2.5). Vaiheessa 1 yhteen suuntaan kuivuvan betonilaatan kuivumisnopeus saadaan kaavalla

$$g = \frac{v_{s,sat} - v_a}{Z_{v,s}} \quad (2.5)$$

missä  $v_{s,sat}$  on ilman kyllästyskosteuspitoisuus haihduttavassa pinnassa,  $v_a$  on ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus ja  $Z_{v,s}$  on pinnan vesihöyrynvastus. Materiaalin kosteudensiirtokerroin on pinnan vesihöyrynvastuksen käänteisluku

$$\beta_v = \frac{1}{Z_{v,s}} \quad (2.6)$$

jolloin kaavan (5) voi esittää muodossa

$$g = \beta_v(v_{s,sat} - v_a) \quad (2.7)$$

Kosteudensiirtokerroin riippuu ilmavirran liikkeistä laatan pinnalla ja on sisätiloissa tyypillisesti  $\beta_v = 3 \cdot 10^{-3}$  m/s. (Vinha 2011)

Vaiheessa 2 rakenne on kuivunut niin paljon, ettei kosteus siirry enää kapillaarisesti yhtenäisesti koko rakennepaksuudelta. Kuivuminen onkin vaihetta 1 hitaampaa, kun rakenteen vesihöyrynvastus  $Z_{v,rak}$  kasvaa laatan kuivuessa. Kapillaarista nousua tapahtuu kuitenkin edelleen syvemmällä rakenteessa, jolloin kosteus poistuu rakenteesta osittaisen kapillaarivirtauksen, pintadiffuusion ja diffuusion avulla. Kosteuspitoisuus alenee lähellä pintaa nopeammin kuin rakenteen keskellä. (Vinha 2011)

Vaiheessa 3 rakenteen ulkopinnan kosteuspitoisuus on saavuttanut ympäristön kanssa hygroskooppisen tasapainokosteuden, jolloin rakenne kuivuu vain sisäosistaan. Kuivuminen tapahtuu tällöin käytännössä vain diffuusion avulla, ja kuivumisnopeus riippuu lähes ainoastaan rakenteen sisäosan ja pinnan välisestä vesihöyrynvastuksesta  $Z_{v,rak}$ . Vaiheissa 2 ja 3 kaava (2.5) muuntuukin muotoon

$$g = \frac{v_{s,sat} - v_a}{Z_{v,rak}} \quad (2.8)$$

Kuivumisnopeuden laskenta myöhemmissä vaiheissa tällä kaavalla on kuitenkin haasteellista, sillä  $Z_{v,rak}$  kasvaa jatkuvasti rakenteen kuivuessa. Kosteuspitoisuuden tarkempaan laskentaan voidaan käyttää Fourierin sarjaa

$$w'(x, t) = \frac{4}{\pi} \left[ \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) * e^{-\pi^2 \frac{D_w t}{L^2}} + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\pi x}{L}\right) * e^{-9\pi^2 \frac{D_w t}{L^2}} \right], \text{ kun } t \geq \frac{L^2}{36D_w} \quad (2.9)$$

$$w'(x, t) = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_w t}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{L-x}{\sqrt{4D_w t}}\right) - 1, \text{ kun } 0 \leq t \leq \frac{L^2}{36D_w} \quad (2.10)$$

missä  $x$  on syvyys rakenteen pinnasta (m),  $t$  on aika (s),  $L$  on rakenteen kokonaispaksuus (m) ja  $D_w$  on materiaalin kosteusdiffusiviteetti ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). (Vinha 2011)

Tulilattia-putken läpi kulkevan ilman tilavuusvirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) saadaan kaavalla

$$R_a = r_a * A \quad (2.11)$$

missä  $r_a$  on ilmavirran nopeus (m/s) ja  $A$  on putken poikkileikkauksen pinta-ala. Pinta-alan pystyy lausumaan putken sisähalkaisijan avulla

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (2.12)$$

jolloin kaava (2.11) muuttuu muotoon



$$R_a = \frac{v_a * \pi * d^2}{4} \quad (2.13)$$

Putkien läpi konvektion avulla siirtyvän kosteusvirran (g/s) voi laskea kaavalla

$$G_{conv} = R_a(v_1 - v_2) \quad (2.14)$$

missä  $R_a$  on ilman tilavuusvirta ( $m^3/s$ ) ja  $v_1$  ja  $v_2$  vesihöyrypitoisuudet ( $g/m^3$ ) putken alku- ja loppupäässä. (Vinha 2011) Kun tiedetään laatan pinta-ala, kosteusvirta voidaan ilmaista neliömetriä kohti yksikössä  $g/(m^2 \cdot h)$ .

Absoluuttisen kosteuden arvot eli vesihöyrypitoisuudet saadaan laskettua kaavalla

$$v = \left( \left( 4,85 + 3,47 * \frac{T}{10} \right) * 10^{-3} + 0,945 * \left( \frac{T}{10} \right)^2 + 0,158 * \left( \frac{T}{10} \right)^3 + 0,0281 * \left( \frac{T}{10} \right)^4 \right) * \frac{RH}{100}$$

missä  $T$  on ilman lämpötila ( $^{\circ}C$ ) ja  $RH$  on suhteellinen kosteus (% RH).

Kaikki tuoreessa betonilaatassa oleva vesi ei haihdu, vaan osa siitä kuluu veden ja sementin välisessä hydrataatioreaktiossa. Reaktiossa kuluvan vesimäärän voi arvioida kaavalla

$$w_{hydr} = \zeta_{cem} * \alpha_{hydr} * C \quad (2.15)$$

missä  $\zeta_{cem}$  on sementin tyypistä riippuva kerroin (yleensä 0,25),  $\alpha_{hydr}$  on hydratoitumisaste (tyypillisesti 0,8) ja  $C$  on sementin massa betonikuutiossa ( $kg/m^3$ ).

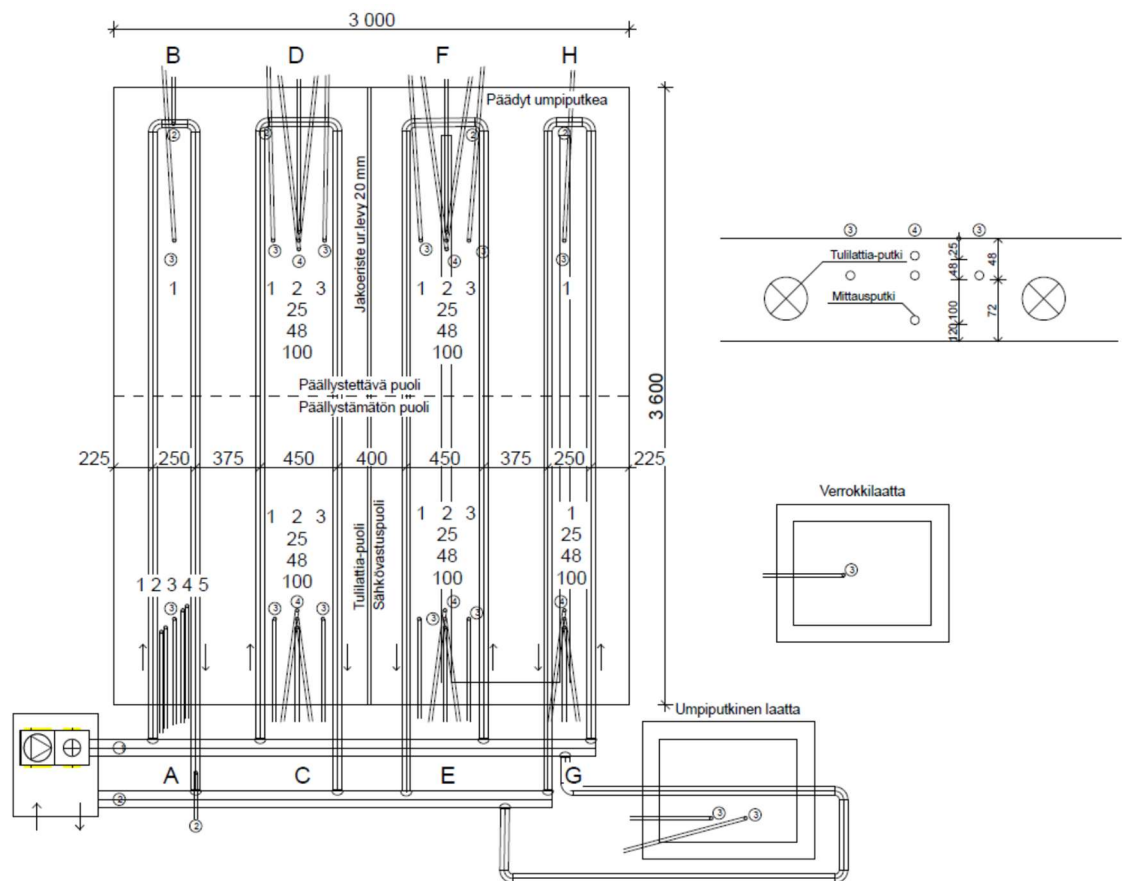
### 3. BETONILAATAN KUIVUMISKOKEET

#### 3.1 Koejärjestely

Tampereen Atalaan tehtiin koevalu, jossa mitataan lämmينilmaputkiston kuivattavaa vaikutusta. Samaan tilaan valettiin lisäksi kaksi vertailulaattaa samasta betonimassasta.

##### 3.1.1 Valettavat laatat

Valettavan laatan paksuus oli 120 mm, joka on Tulilattia-järjestelmän yleinen vaatimus. Suunnitelma koejärjestelystä on esitetty kuvassa 3.1. Laatan alapinta vuorataan muovilla, jolloin minimoidaan mahdollinen alaspäin tapahtuva kuivuminen.



**Kuva 3.1.** Koejärjestelyn suunnitelma

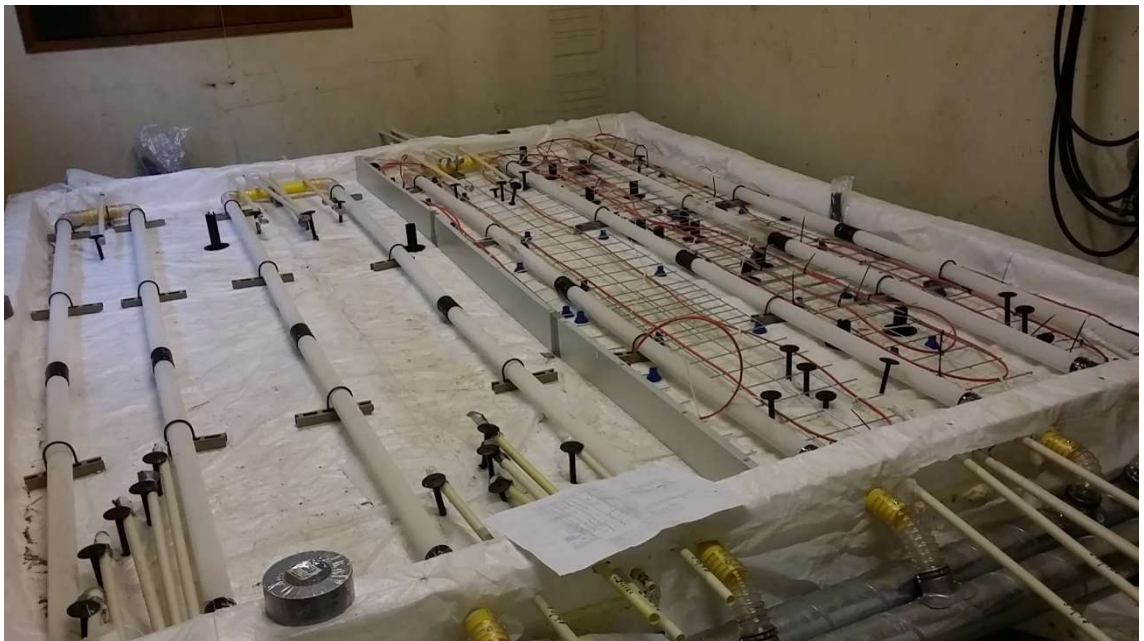
Koevalun varsinainen tutkimuslaatta jaettiin neljään osaan, joista kaksi päällystettiin kosteutta läpäisemättömällä muovikalvolla ja kaksi jätettiin pinnastaan paljaaksi. Laatan toiseen puoliskoon asennettiin lisäksi sähköinen 3 kW:n lattialämmityskaapeli kulkemaan putkijaon puolivälissä (kuva 3.3). Tällä järjestelyllä pyrittiin saamaan kosteusvirta liikumaan tehokkaammin putkia kohti. Neljä osaa seurattavassa laatussa olivat siis kuivatus

sähkölämmityksen avustuksella muovi päällä ja ilman muovia sekä kuivatus ilman sähkölämmitystä muovi päällä ja ilman muovia. Sähkövastuksella vahvistettua laatan puoliskoa kutsutaan tässä tutkimuksessa sähkövastuspuoleksi ja ilman sähkövastusta kuivattavaa puolta Tulilattia-puoleksi. Jokaisessa osassa oli yksi kierto k250-jaolla ja yksi kierto k450-jaolla. Mittaussektoreita oli siis yhteensä kahdeksan, jotka on lueteltu taulukossa 3.1. Ne on myös esitelty liitteessä 6.

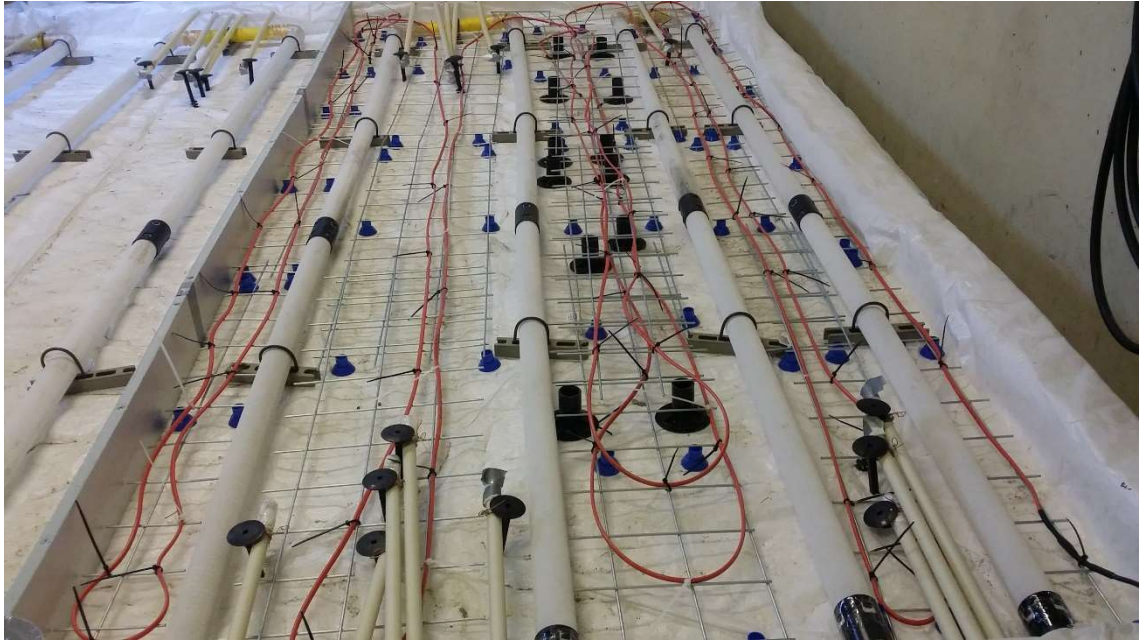
**Taulukko 3.1.** Laatan eri mittaussektorit.

Sektori	k-jako	Sähkövastus	Päällystys
A	250	Ei	Ei
B	250	Ei	Kyllä
C	450	Ei	Ei
D	450	Ei	Kyllä
E	450	Kyllä	Ei
F	450	Kyllä	Kyllä
G	250	Kyllä	Ei
H	250	Kyllä	Kyllä

Tutkimuslaatta ennen valua on esitetty kuvassa 3.2. Kosteusanturit asennettiin laatan sisään valettuihin sähköputkiin. Sähköputkien päähän lovettiin alapintaan 10 mm leveä aukko, ja putken päätyaukko eristettiin ilmastointiteipillä, jolloin kosteuspitoisuus saatiin mitattua täsmällisesti halutulta syvyydeltä.



**Kuva 3.2.** Virtausputkisto ja kosteusantureita varten asennetut putket. Ylhäällä päällystetty ja alhaalla päällystämätön puoli.

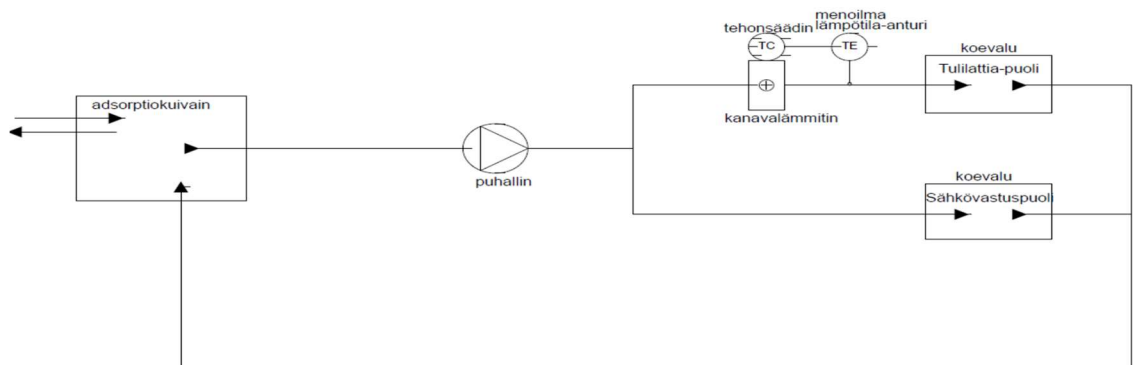


**Kuva 3.3.** Laattaan asennettu sähkökaapeli.

Varsinaisen tutkimuslaatan viereen valettiin kaksi vertailulaattaa, joista toisen läpi vietiin lämmittävä umpiputki, jolloin järjestelmästä saatiin lämmittävä vaikutus ilman putkessa virtaavan ilman kykyä kuljettaa kosteutta. Laatasta käytettiin tutkimuksen kirjanpidossa nimitystä umpiputkinen laatta. Toisen vertailulaatan annettiin kuivua pelkästään pinnan kautta ilman sisällä kiertäviä putkia, ja siitä käytettiin tutkimuksessa nimeä verrokki. Lisäksi valettiin yhdeksän koekappaletta laboratoriossa mahdollisesti myöhemmin suoritettavia kosteusominaisuuksien mittauksia varten.

### 3.1.2 Kuivatuslaitteisto

Suljettuun lämmityspiiriin kytkettiin puhallin, VEAB-kanavalämmitin ja adsorptiokuivain CTR 500XT (kuva 3.4). Kuivain emuloi Tulilattia-järjestelmän virtausilmaa lämmittävää ja kuivattavaa vaikutusta.



**Kuva 3.4.** Lämmityspiirin kaavio.

Puhallin puhalsi kuivaa ja lämmintä ilmaa putkistoon. Virtaavasta ilmasta mitattiin lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä meno- että tulopuolelta. Kuivaimen teho oli 1,5 kilowattia. Tulilattia- ja sähkövastuspuoli erotettiin toisistaan niin, että molempien meno- ja paluuilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin omanaan. Kanavalämmitin lämmitti ainoastaan Tulilattia-puolelle menevää ilmaa.

### 3.1.3 Mittauslaitteisto

Lämpötilan ja kosteuden mittaukseen käytettiin Vaisalan HMP110-antureita. Antureita oli käytössä yhteensä 16 kappaletta. Antureiden lämpötilan mittausalue on  $-40...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja suhteellisen kosteuden mittausalue  $0-100\text{ \% RH}$ . Anturit olivat yhteydessä Metecnon teollisuustietokoneeseen, joka toimi dataloggerina. Putkien menoilman virtausnopeus luettiin Omegan anemometrillä, joka tallen mittauks tulokset kymmenen minuutin välein.

### 3.1.4 Mittauspisteiden sijoittelu

Mittauksia suoritettiin kolmelta eri syvyydeltä: 25, 48 (40 % laatan paksuudesta) ja 100 millimetriä (kuva 3.5). Mittausputkien päät sidottiin pohjaeristeeseen ruuvattuihin muoviruuveihin, joiden korkeutta säätämällä mittausanturit saatiin juuri haluttuun korkeusasemaan. Jatkuvaan mittaukseen valittiin putkissa virtaavan meno- ja paluuilman lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä menoilman virtausnopeus. Meno- ja paluuilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin erikseen sähkövastus- ja Tulilattia-puolella, jolloin molemmista saatiin laskettua omat kosteusvirtakäyränsä. Tulilattia-puolelle asennettiin lisäksi yksi anturi pituussuunnassa keskelle kuivatusputkea, ja yksi anturi mittasi jatkuvasti tutkimustilan huoneilman arvoja. Jatkuvassa mittauksessa käytettiin yhteensä kuutta anturia

Varsinaisessa tutkittavassa laatussa oli yhteensä 30 mittauspistettä. Umpiputkisessa laatussa oli kaksi ja verrokkilaatussa yksi mittauspiste. Laattojen kosteuden ja lämpötilan mittaukseen oli käytössä yhteensä kymmenen anturia, joiden paikkoja siirreltiin aina kulloisenkin tarpeen mukaan. Ison laatan kahdeksan sektoria oli nimetty kirjaimin A–H ja mittauspisteet tarkemmin numeroin 1–3. Mittaussyvyys ilmoitettiin millimetreinä. Mittaussyvyys oli oletusarvoisesti 48 mm, eri syvyydet on ilmaistu mittauspisteen nimessä.



**Kuva 3.5.** Mittauspisteet kolmella eri korkeudella.

Leveämmällä 450 mm:n putkijaolla mittauspisteet sijaitsivat 50 mm:n etäisyydellä putken ulkoreunasta ja keskellä putkijakoa (200 mm lämmityspotken reunasta). Kapeammalla 200 mm:n jaolla mittauspisteet sijoitettiin A-sektoriin 25 ja 50 mm:n etäisyydelle sekä keskelle jakoa (100 mm). Muissa kapeamman k-jaon sektoreissa (B, G ja H) mittauspisteet ovat vain keskellä putkijakoa.

Eri mittauspisteistä saatujen mittaustulosten avulla saatiin muodostettua laatan kosteuskajauma leveys- ja korkeussuunnassa.

Umpiputkiseen laattaan vietiin kaksi mittausputkea, molemmat 48 mm:n syvyydelle ja pituussuunnassa keskelle laattaa (kuva 3.6).





**Kuva 3.6.** Umpiputkisen laatan mittauspisteet.

Koska lämmitysputki on vain mittauspisteen toisella puolella, mittausetäisyydeksi valitaan puolet varsinaisessa laatussa putkien puolivälissä käytetystä, jolloin välimatkat olivat 50 ja 100 mm.

## 3.2 Kokeen suoritus

Koelaatan valun jälkeen sen kuivumista seurattiin noin neljän ja puolen kuukauden ajan. Antureita ei riittänyt jokaiseen mittauspisteeseen, joten niitä siirrettiin useaan otteeseen mittausjakson aikana. Mittausjakson aikana sähkövastus, puhallus, kanavalämmitys ja kuivaus olivat välillä pois päältä tuloksien kirjaamisen ajan. Kuivausta ja kanavalämmitystä pidettiin osan mittausjaksoa ajastettuna päällä kuuden tunnin jaksoissa. Laatan kosteuspitoisuuden seuranta aloitettiin 10 päivän jälkihoidon jälkeen. Laatan kosteuspitoisuuden lisäksi seurattiin Tulilattia-putkissa vallitsevaa ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa meno- ja paluupisteessä sekä keskellä putken pituutta.

### 3.2.1 Koelaatan valu ja käytetty betonimassa

Koelaatta ja vertailulaatat valettiin samasta betonierästä 1.4.2016. Betoni tärytettiin ja hierrettiin kuten tavallisessa työmaakohteessa. Kokeessa käytetty lattiabetoni tilattiin Lujabetonin Ruskon betoniasemalta. Käytetyn betonimassan lujuusluokka oli C25/30, notkeus S3 ja maksimiraekoko 16 mm. Betonierän valmistusta seurattiin vierestä, ja toteutuneet ainesuhteet todennettiin laboratoriotulosteesta (liite 5). Kiviaines sekoitettiin 0-8 mm ja 6-16 mm maa-aineksista sekä filleristä. Käytetty sementti oli CEM II -luokkaa.

### 3.2.2 Mittauslaitteiston kalibrointi

Anturit kalibroitiin valmistajan toimesta ennen niiden käyttöönottoa. Kalibrointi suoritettiin vertaamalla HMP110-antureiden antamaa lämpötila- ja RH-lukemaa kalibroidun HMT337-lähettimen antamiin arvoihin. Suhteellisen kosteuden mittauslukeman virhe oli välillä +0,53...+0,82 % RH referenssikosteuden ollessa 90,40–91,83 % RH. Pienemmillä referenssikosteuksilla virhe oli pienempi. Lämpötilan virhe oli -0,01...-0,02 °C referenssilämpötilan ollessa +22,25...+22,29 °C.

Antureiden tarkistuskalibrointi suoritettiin mittausten päätyttyä Vahanen rakennusfyysikka Oy:ssä. Ennen kalibrointia kosteuskokemien virhe oli +0,7...+2,0 % RH referenssikosteudessa 10,8 % RH, -2,3...+1,2 % RH referenssikosteuden ollessa 74,1–74,3 % RH ja -1,8...-3,1 % RH referenssikosteudella 97,7–99,1 % RH. Lämpötilan VAIHTELU oli huoneenlämmössä -0,1...+0,2 °C. Kalibrointi suoritettiin kolmessa eri suolaliuoksessa Vaisalan HMK 13B -kosteuskalibrointilaitteella. Mittauslukema kalibroitiin 10,8 % RH:in ja 97,2–97,9 % RH:in, minkä jälkeen antureiden antamat lukemat tarkastettiin 73,7–74,7 % RH:n referenssikosteudessa, jossa mittausvirhe oli -1,4...+0,7 % RH. Lämpötilan kalibroinnissa referenssilämpötilana käytettiin +23,1...+23,7 °C. Kalibroinnin jälkeen virhettä ei ollut. Kalibrointitodistukset ovat liitteessä 2.

Tarkistuskalibroinnin tuloksena saadut virheet olivat sen verran pieniä, ettei niiden perusteella korjattu betonin sisältä mitattuja arvoja. Virheet olivat betonin mittauksien RH-alueella luokkaa -2,0...+1,0 % RH. Ilmavirrasta mitatut suhteellisen kosteuden arvot sen sijaan korjattiin sillä oletuksella, että arvojen ”ryömiminen” on ollut nopeampaa mittausjakson alussa. Ilmavirrasta mitatuissa RH-arvoissa muutamankin prosentin virhe saattaa vaikuttaa voimakkaasti arvoista lasketun kosteusvirran suuruuteen.

### 3.2.3 Antureiden liikuttelu

Antureita siirrettiin jatkuvasti mittausten edetessä. Betonin lämpötila- ja kosteusarvojen mittaukseen varatuista antureista yksi antoi pelkän lämpötilan arvon, joten vaihtuviin 33 mittauspaikkaan oli käytössä yhdeksän anturia. Siirtoväli vaihteli yhdestä päivästä 23 päivään. Tavallisin siirtoväli oli kuitenkin 1-5 päivää. Kaikkien yhdeksän anturin siirtämiseen meni tyypillisesti aikaa noin tunti. Antureiden sijainneista kullakin ajanhetkellä pidettiin tarkkaa kirjaa koko mittausprosessin ajan. Antureiden siirtotaulukko on liitteessä 1.



### 3.2.4 Mittausputken tiivistys

Mittausputki tiivistettiin anturin tyven kohdalta, jolloin mitattava ilmatilavuus oli mahdollisimman pieni, eikä huoneilma päässyt aiheuttamaan suurta epätarkkuutta mittaustuloksiin. Tiivistykseen käytettiin mittausputken muotoon leikattua solumuovia, jonka pysyminen paikallaan johdossa varmistettiin vielä elastisella massalla (kuva 3.7).



*Kuva 3.7. Mittausputken tiivistys.*

Mittausputken päähän laitettiin vielä elastista massaa lisävarmistukseksi. Mittausten välissä mittausputki tiivistettiin rautalankaan kiinnitetyllä samanlaisella solumuovilla mittauspistettä ympäröivän betonin kuivumisen estämiseksi.

### 3.2.5 Lämmittimen ja kuivaimen käyttö

Puhaltimen piiriin kytkettyjä kanavalämmitintä ja adsorptiokuivainta pidettiin mittausjakson aikana osan aikaa yhtäjaksoisesti päällä ja osan aikaa syklisesti kuuden tunnin jaksoissa. Päiväkirja laitteiden käytöstä on koottu taulukkoon 3.2.

**Taulukko 3.2.** Puhaltimen, kanavalämmittimen ja adsorptiokuivaimen käyttö mittausjaksolla.

Aikaväli	Puhallin	Kanavalämmitin	Kuivain
11.4.–25.4.	Päällä	Päällä	Pois
25.4.–10.5.	Päällä	Päällä	Päällä
10.5.–16.5.	Päällä	Pois	Pois
16.5.–19.5.	Pois	Pois	Pois
19.5.–21.5.	Päällä	Päällä	Pois
21.5.–27.5.	Pois	Pois	Pois
27.5.–28.5.	Päällä	Päällä	Päällä
28.5.–4.6.	Päällä	Syklinen 6 h	Päällä
4.6.–21.6.	Päällä	Syklinen 6 h	Syklinen 6 h
21.6.–3.8.	Päällä	Päällä	Päällä
3.8.–25.8.	Pois	Pois	Pois

Sykliisellä lämmityksellä ja kuivatuksella kosteuden ajateltiin pääsevän kulkeutumaan paremmin betonin ja putken rajapintaan, kun betoni ei pääse kuivumaan liikaa putken välittömässä ympäristössä. Se saattaa kasvattaa putkien kautta tapahtuvaa keskimääräistä kosteusvirtaa.

### 3.2.6 Sähkövastuksen käyttö

Sähkövastus asetettiin ajastimen päähän, jolla hallittiin keskimääräistä lämmitystehoa. Ajastimessa oli 24 tunnin kello 15 minuutin sykleillä. Mittausten alussa laatta lämpeni ilman ajastinta yli +60 °C:en (antureiden mittausalueen yläraja). Sopivaksi lämmityssykliksi todettiin kokeilemalla 15 minuuttia päällä ja 30 minuuttia pois, jolloin sähkövastuksen keskimääräinen lämmitysteho oli 1,0 kW. Lämpötila vaihteli sähkövastuspuolella tuolloin välillä +36...+40 °C. Keskimääräinen lämmitysteho pudotettiin 0,75 kilowattiin (15 minuuttia päällä, 45 minuuttia pois) laatan ollessa 81 päivän ikäinen, minkä jälkeen lämpötilan vaihteluväli oli +34...+37 °C. Sähkövastuksen käyttö mittausjaksolla on esitetty taulukossa 3.3.

**Taulukko 3.3.** *Sähkövastuksen käyttö mittausjaksolla.*

Aikaväli	Sähkövastus
11.4.–21.4.	Pois
21.4.–22.4.	3,0 kW
22.4.–23.4.	1,5 kW
23.4.–11.5.	1,0 kW
11.5.–27.5.	Pois
27.5.–10.6.	1,0 kW
10.6.–21.6.	Pois
21.6.–3.8.	0,75 kW
3.8.–25.8.	Pois

Välillä laatan lämpötila tasattiin +20...+25 °C:en tulosten lukemisen ajaksi, jolloin sähkövastus otettiin kokonaan pois päältä. Kyseisillä aikaväleillä huonetilan ja laatan lämpötilaa hallittiin huoneessa olevalla sähköpatterilla.

### 3.2.7 Tulosten lukeminen

Dataloggeri luki kosteuden ja lämpötilan arvot 10 minuutin välein csv-muotoiseen Excel-tiedostoon. Loggeriin oli käytössä etäyhteys, joten datan tallentamiseksi ei tarvinnut käydä paikan päällä. Datan kerääminen otettiin pois päältä aina antureiden siirron ajaksi. Jokaisen antureiden siirron jälkeen data kerättiin uuteen csv-tiedostoon.

### 3.2.8 Päälystys

Puolet koelaatasta päälystettiin ohuella 0,03 mm paksuisella muovilla betonilaatan ollessa 56 päivän ikäinen 27.5.2016. Sen tilalle asennettiin paksu muovimatto (kuva 3.8) 88 päivän ikäisenä 28.6.2016.



**Kuva 3.8.** Muovimatto asennettuna paikalleen.

Molempien päällystysten jälkeen anturit siirrettiin tarkkailemaan kosteuden kehitystä päällysteen ja laatan välistä kolmesta pisteestä: Tulilattia-puolella putken päällä ja putkien k-jaon puolivälissä sekä sähkövastuspuolella putkien k-jaon puolivälissä sähkövastuksen yläpuolella. Antureita varten mattoon puhkaistiin noin  $1 \text{ cm}^2$  kokoiset reiät, jotka tiivistettiin antureiden sisäänviennin jälkeen elastisella massalla. Loput kuusi anturia laitettiin päällysteen alle pisteisiin D2 25, D2 48, D2 100, F2 25, F2 48 ja F2 100 tarkkailemaan kosteusjakauman kehitystä korkeussuunnassa päällystyksen jälkeen.

## 4. TUTKIMUSTULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

### 4.1 Laatan koetulokset

Mittausdataa kerättiin aikavälillä 11.4.–25.8.2016 eli yhteensä 136 päivää. Mittaushetkiä oli kyseisellä aikavälillä yhteensä 18 990 kappaletta. Koelaatan kuivumisnopeuteen vaikuttavia muuttujia ovat putkien k-jako, sähkövastuksen käyttö, päällystys, mittaustäisyys putkesta ja mittaussyvyys. Yhden muuttujan vaikutusta tutkittaessa mittaustuloksista tulee valita aina vertailupari, jossa kaikki muut muuttujat ovat samoja ja vain tutkittava suure muuttuu. 48 mm:n syvyydeltä mitattuja kosteuksia on verrattu lisäksi verrokkilaatan kosteusarvoihin. Kaikki mittaustulokset mittausjakson lopussa ovat koottuina liitteeseen 3.

#### 4.1.1 Laatan kosteuspitoisuuden kehitys

Mittausten alkaessa laatan ollessa kymmenen päivän ikäinen mittauspisteiden mitatut kosteudet olivat 92–96 % RH. Mittausputkien ympäristö on todennäköisesti ollut tuossa vaiheessa muuta laattaa kuivempi, kun kosteus on päässyt haihtumaan mittauskohdasta. Betonin huokosilman suhteellinen kosteus on välittömästi valun jälkeen tyypillisesti 100 % RH. Mittausten loppupuolella laatta oli kuivimmillaan päällystämättömällä sähkövastuspuolella k250-alueella 25 mm:n syvyydessä (piste G1 25), jossa suhteellinen kosteus oli 67 % RH. Laatan kostein kohta oli päällystetyllä Tulilattia-puolella k450-alueella 100 mm:n syvyydessä (piste D2 100), jonka kosteus oli 86 % RH. Samassa tilassa ollut verrokkilaatta oli mittausten päättyessä 81 % RH:n suhteellisessa kosteudessa.

#### 4.1.2 Kriittiset kosteuspitoisuudet

Vertailuun valittiin varsinaisen koelaatan jokaisesta sektorista k-jaon puolivälissä oleva 48 mm:n syvyydessä oleva mittauspiste (taulukko 4.1). Osa mittauspisteistä kuivui 90 % RH:n rajaa kuivemmaksi jo ennen kuin mittausta ehdittiin aloittaa kyseisestä pisteestä. Osa taas ei ehtinyt mittausjakson aikana kuivumaan 80 % RH:n alapuolelle.

**Taulukko 4.1.** Mittauspisteiden kuivuminen eri kosteusarvoihin.

Nimi	k-jako	Sähkövastus	Päällystys	90 % RH (d)	85 % RH (d)	80 % RH (d)
A3	250	Ei	Ei	21	51	95
B1	250	Ei	Kyllä	32	52	>146
C2 48	450	Ei	Ei	<27	56	106
D2 48	450	Ei	Kyllä	52	81	>146
E2 48	450	Kyllä	Ei	<32	40	97
F2 48	450	Kyllä	Kyllä	31	70	>146
G1 48	250	Kyllä	Ei	<33	36	40
H1	250	Kyllä	Kyllä	<32	37	78
Verrokki	-	Ei	Ei	57	86	>146

Piste A3 Tulilattia-puolen k250-alueella saavutti 90 % RH:n ensimmäisenä (21 d), joskin sähkövastuspuolella vastaavista pisteistä (G1 48 ja H1) kummassakaan ei mittaus alkanut ennen 32. päivää. Laattaa ei oltu siihen mennessä vielä päällystetty. Piste G1 48 saavutti sekä 85 % RH:n (36 d) että 80 % RH:n (40 d) ensimmäisenä kaikista mittauspisteistä. Piste H1 saavutti 85 % RH:n lähes samassa ajassa (37 d), mutta päällystys hidasti sen kuivumista selkeästi, ja se saavutti 80 % RH ”vasta” 78 päivän kohdalla. Onkin hyvin todennäköistä, että pisteet G1 48 ja H1 saavuttivat myös 90 % RH:n ennen pisteitä A3 ja B1. A3 ja B1 olivat 85 % RH:ssa 51 ja 52 päivän kohdalla. 80 % RH:n tason A3 saavutti 95 päivässä, B1 ei saavuttanut kyseistä tasoa muovimaton alla enää lainkaan. Sähkövastuspuolella laatan ylikuumentuminen mittausjakson alussa kuivatti laattaa hyvin tehokkaasti.

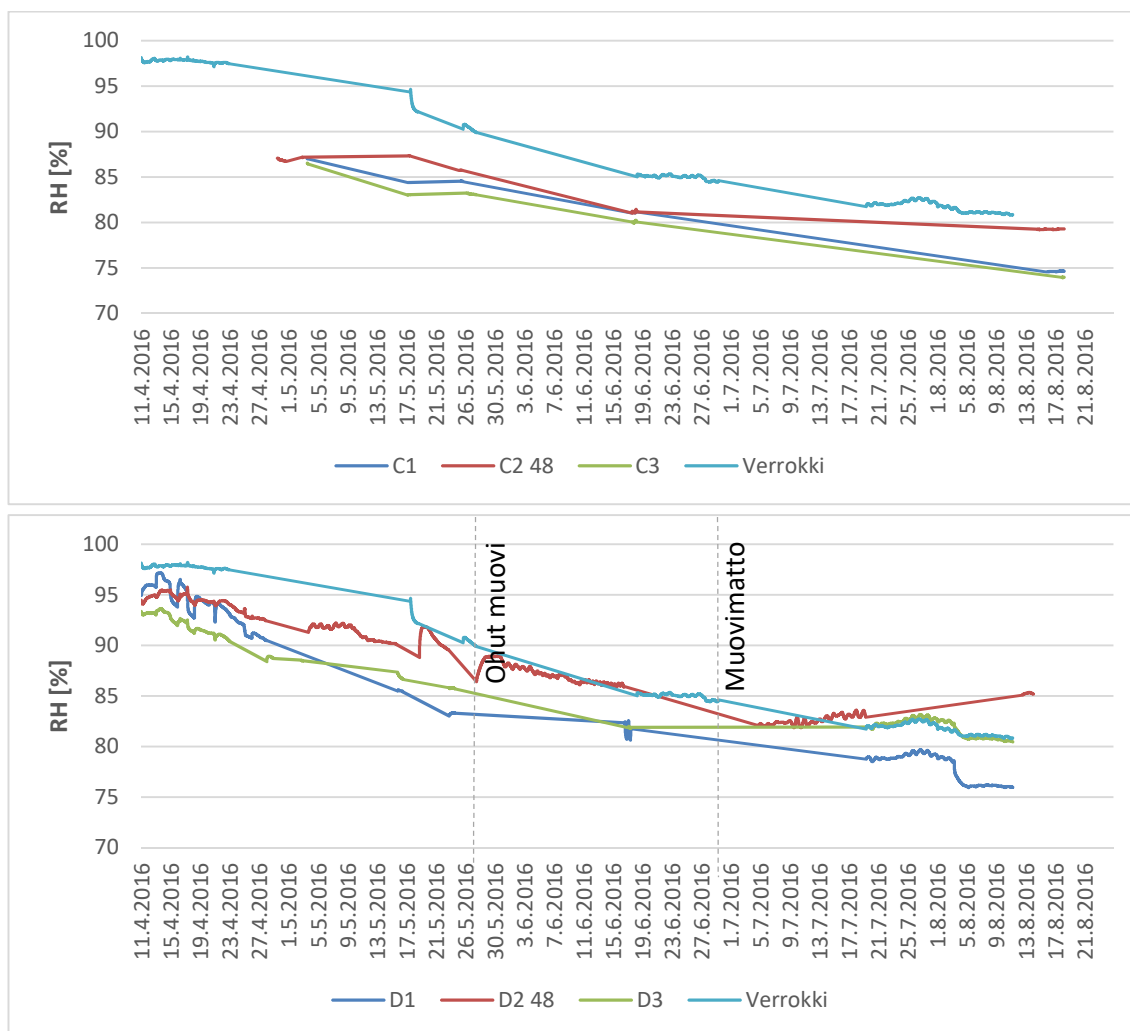
Suuremmalla k-jaolla k450 tuloksissa oli enemmän hajontaa. Tulilattia-puolella piste C2 48 saavutti 90 % RH:n jo ennen mittausten alkamista kyseisessä pisteessä 27 päivän kohdalla. Tuolloin vielä päällystämätön piste D2 48 saavutti saman rajan vasta lähes kolme viikkoa myöhemmin 52 päivän ikäisenä. Piste C2 48 kuivui 85 % RH:in 56 päivän ikäisenä, eli samaan aikaan kun laatan toiselle puolelle asennettiin ohut muovi. D2 48 saavutti 85 % RH:n ohuen muovin alla noin kuukautta myöhemmin 81 päivän kohdalla. Syitä radikaalille erolle kuivumisnopeudessa on vaikea löytää. C-sektori oli valun jälkeen lähes kuukauden ajan mittausten ulkopuolella, jona aikana mittauspisteen ympäristö on saattanut kuivua ja aiheuttaa tulosten suuren poikkeaman. Mittauspiste oli kyllä tulpattuna, mutta tiivistys on saattanut vuotaa. 80 % RH:a piste D2 48 ei saavuttanut muovimaton alla lainkaan, C2 48 kuivui kyseiseen tasoon 106 päivän kohdalla. Sähkövastuspuolella (pisteet E2 48 ja F2 48) erot olivat samankaltaiset.

Kriittisten kosteuspitoisuuksien saavuttamiseen kuluvasta ajasta näkyy yksittäisistä epäloogisuuksista huolimatta selkeästi eri muuttujien vaikutus kuivumisnopeuteen. Sähkövastuksen käyttö ja Tulilattia-putkien tiheämpi k-jako selkeästi nopeuttavat kuivumista, päällystys varsinkin paksummalla muovimatolla sitä vastoin hidastaa sitä. Verrokkilaatan kuivumisaika oli hyvin lähellä kappaleessa 2.2 laskettua arvoa, sillä ero laskennalliseen

arvoon oli vain kolme päivää. Kaikki pisteet, jotka jäivät mittausjaksolla yli 80 % RH:n, olivat verrokkilaatassa tai tutkimuslaatan päällystetyllä puolella.

### 4.1.3 Laatan kosteusjakauma sivusuunnassa

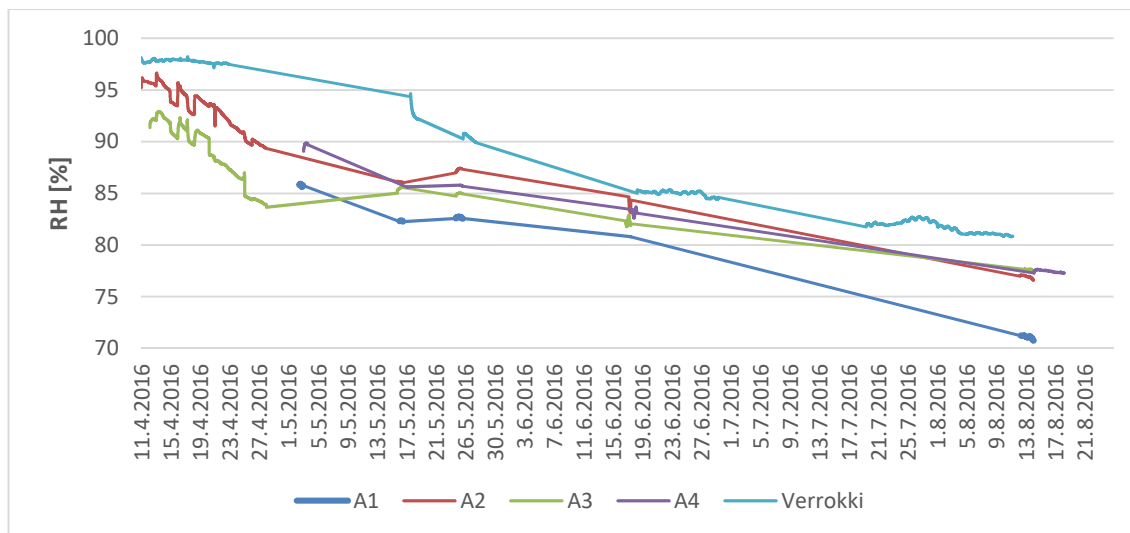
Laatasta tutkittiin k450-alueella jokaisesta neljä sektorista k-jaon keskikohdan (etäisyys putkeen 200 mm) lisäksi kosteuden kehitys myös 50 mm:n etäisyydellä putkesta. Kosteusero keskikohdan ja putkenvierustan välillä kasvoi tasaisesti mittausjakson aikana olleen jakson päätyttyä pistettä D1 lukuun ottamatta 5 % RH:n luokkaa sekä Tulilattia- että sähkövastuspuolella. Havainnekuvat eri sektorien kosteusjakaumista ovat liitteessä 7. Tulilattia-puolen kosteuskuvaajat ovat kuvassa 4.1. D1:ssä ero oli suurempi, noin 9 % RH. Päällystys kasvatti eroa etenkin Tulilattia-puolella, jossa suhteelliset kosteudet olivat pisteissä D2 48 ja D3 lähes samat ennen muovimaton asennusta.



**Kuva 4.1.** Kosteuden kehitys eri etäisyyksillä putkesta Tulilattia-puolella.

Sivusuunnassa ei tapahtunut päällystysten jälkeen samanlaista tasaantumista kuin korkeussuunnassa (katso kappale 4.1.4). Betoni jatkoi kuivumistaan 50 mm etäisyydellä Tulilattia-putkista päällystysten jälkeenkin.

Tiheämmällä putkijaolla k250 kosteuden kuivumista eri etäisyyksillä putkista seurattiin vain päällystämättömällä Tulilattia-puolella eli A-sektorissa (kuva 4.2). Piste A5 päätettiin hylätä tuloksista selvästi muista pisteistä poikkeavien mittaustulosten takia (kappale 4.3). Toisessa 25 mm:n etäisyydellä putkesta olevassa pisteessä A1 kosteus oli mittausjakson päättyessä noin 6 % RH muita saman sektorin mittauspisteitä kuivempi.



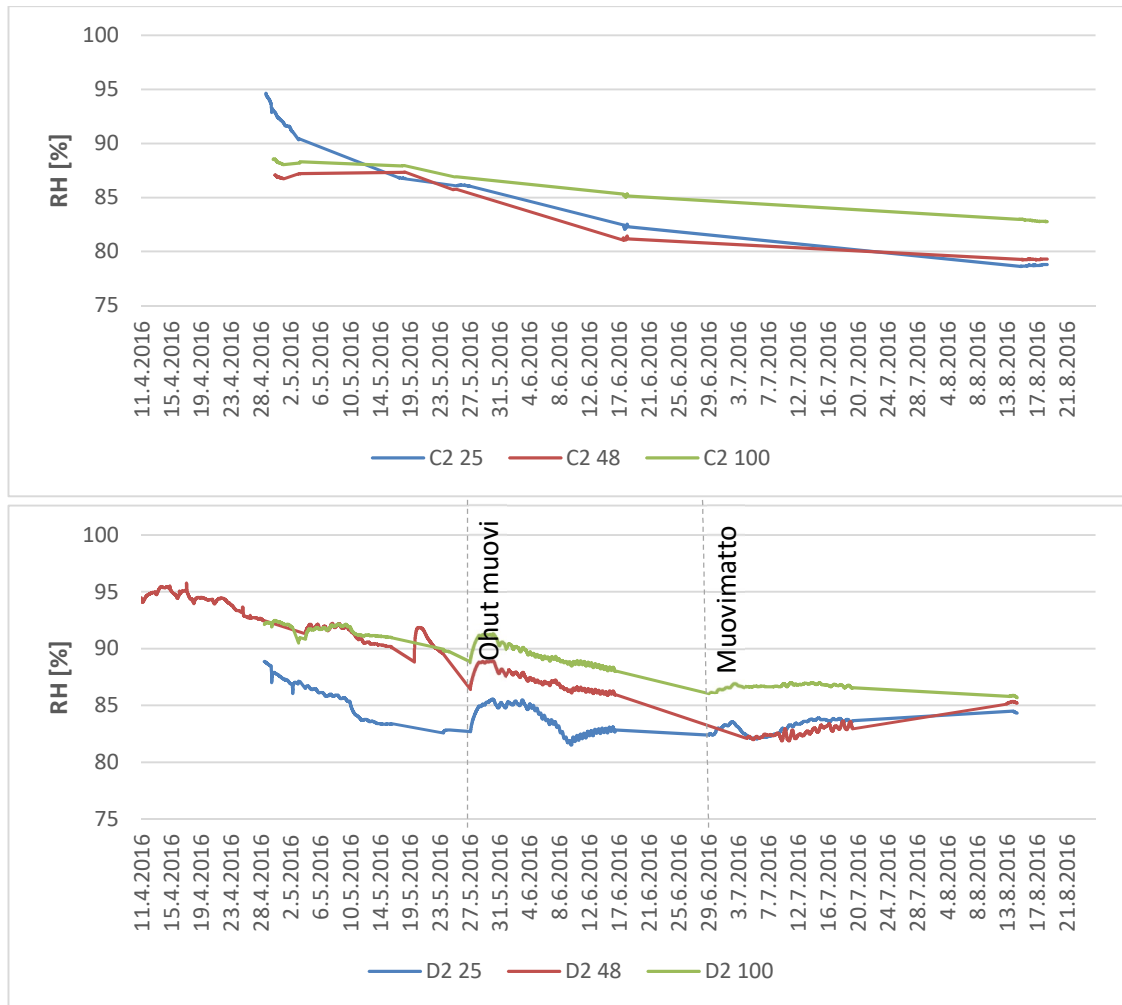
**Kuva 4.2.** A-sektorin kosteuskuvaajat.

Muissa pisteissä suhteelliset kosteudet olivat hyvin lähellä toisiaan, 1 % RH:n sisällä. Mittausjakson aikana keskimääräinen piste A3 oli aluksi jopa 50 mm:n etäisyydellä putkesta olevia mittauspisteitä A2 ja A4 kuivempi. Selkeää syytä siihen ei ole, vaan loogisesti pisteen A3 kuuluisi olla A-sektorin kostein piste.

#### 4.1.4 Laatan kosteusjakauma korkeussuunnassa

Tulilattia-puolella D2-pisteen kosteus jakaantui korkeussuunnassa ilman päällystystä teorian mukaan, eli laatta oli kuivimmillaan 25 mm:n syvyydessä ja kosteimmillaan 100 mm:n syvyydessä. Pisteessä C2 kosteudet olivat 25 ja 48 mm:n syvyyksissä noin 1 % RH:n sisällä toisistaan koko mittauksen ajan. Kosteuden kehitys ennen päällysteen asennusta ja sen jälkeen näkyy kuvassa 4.3.

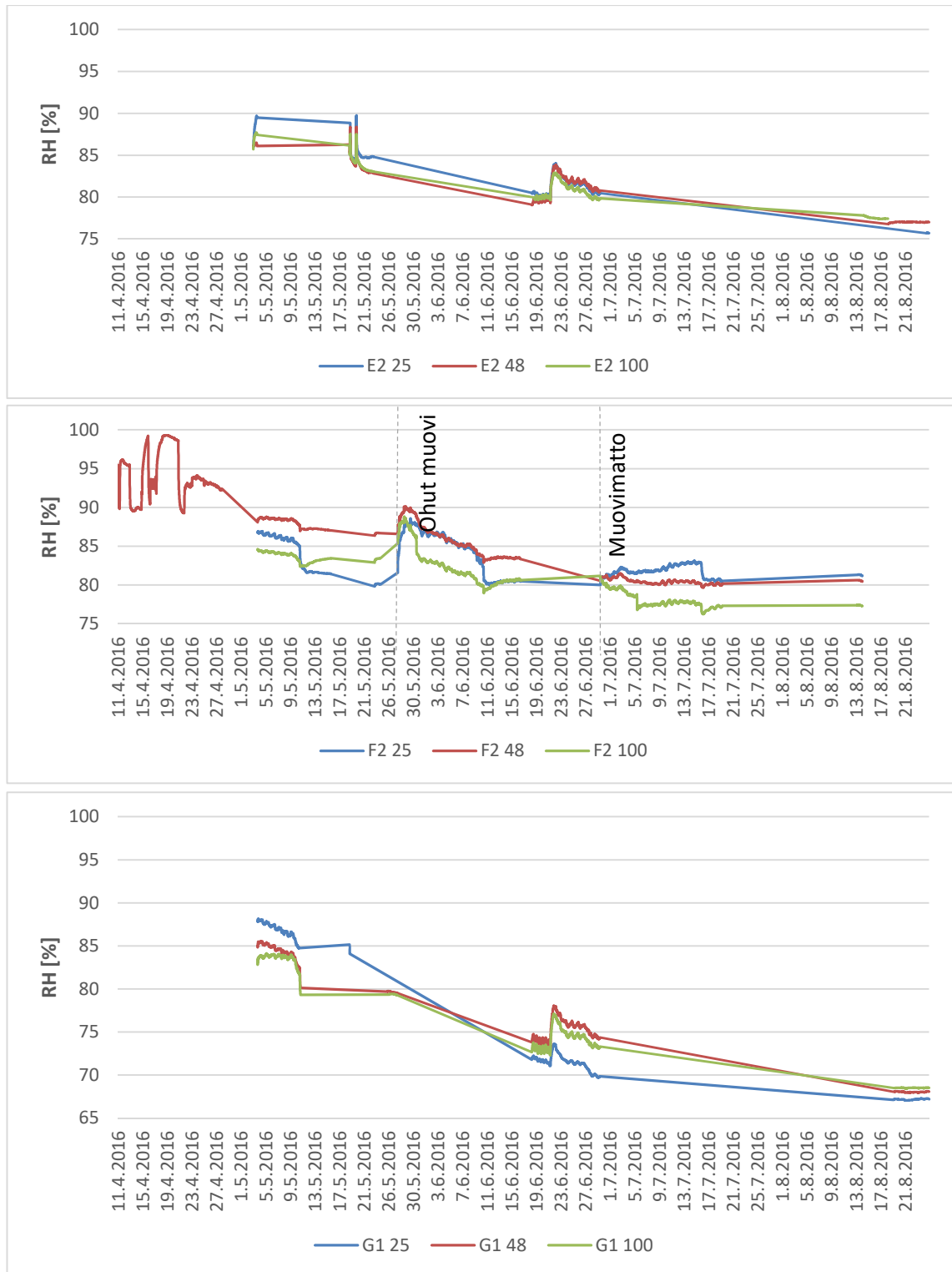




**Kuva 4.3.** Tulilattia-puolen suhteellisen kosteuden kehitys eri syvyyksissä.

Päällystyksen jälkeen (piste D2) kosteuden arvot eri syvyyksissä lähenivät toisiaan ollen mittausten loppuvaiheessa 2 % RH:n sisällä toisistaan.

Sähkövastuspuolella kosteus jakautui korkeussuunnassa hyvin eri tavalla mittausten edetessä. Kosteuskuvaajat ovat esitelty kuvassa 4.4. Välituloksissa suhteellinen kosteus oli ilman päällystystä kahdessa mittauspisteessä jopa pienin 100 mm:n ja suurin 25 mm:n syvyydessä.



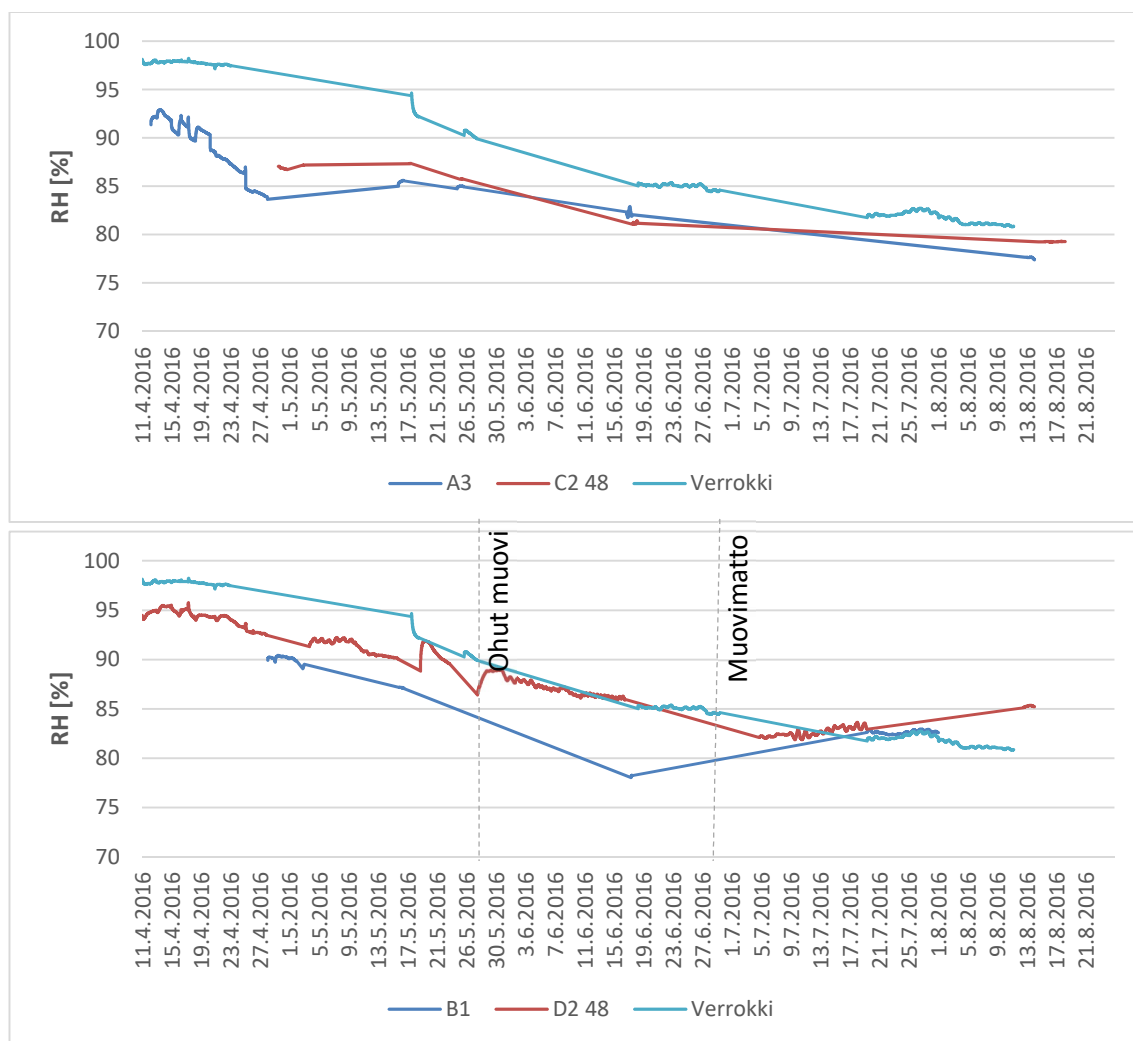
**Kuva 4.4.** Sähkövastuspuolen kosteuden kehitys eri mittaussyvyyksissä.

Epäloogisuuden mittaustuloksissa saattaa aiheuttaa sähkövastuslanka alimman mittauspisteen välittömässä läheisyydessä, joka kuivattaa mittauspisteen ympäristöä. Sähkövastuspuolella päällystys (piste F2) ei vaikuttanut yhtä voimakkaasti laatan kosteusjakaumaan kuin Tulilattia-puolella. Sähkövastuksen aiheuttama laatan ylikuumeneminen

aiheutti myös pisteen F2 48 RH-kuvaajan rajut heilahtelut mittausjakson alussa. Samanlainen voimakas arvojen vaihtelu on nähtävissä myös muissa sähkövastuspuolen mittauspisteissä, joissa oli mittausanturi paikallaan mittausjakson alussa.

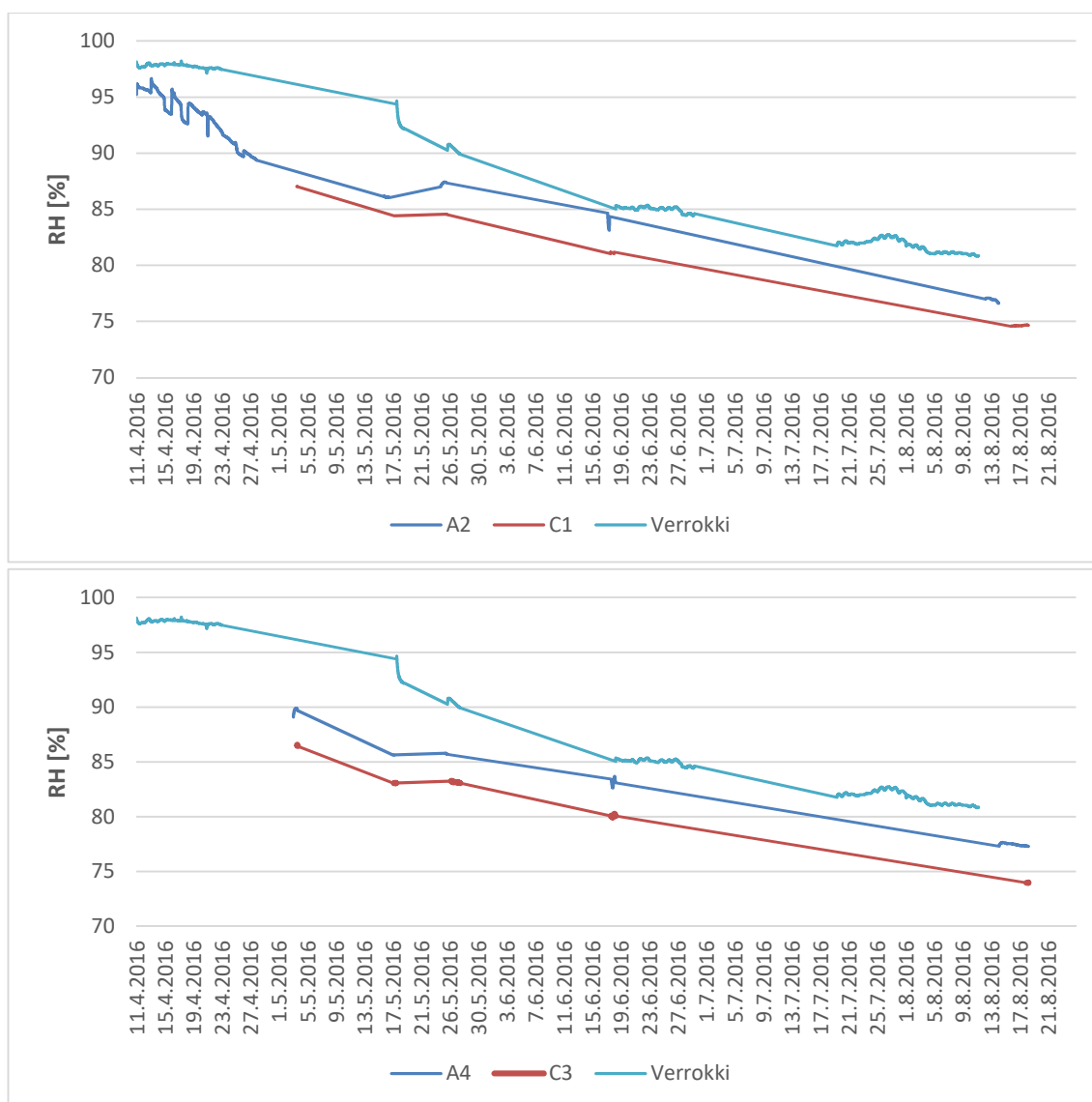
#### 4.1.5 Putkien k-jaon vaikutus

Putkien keskeltä mitattuun kosteuteen k-jaolla oli selvä vaikutus; kuudesta vertailuparista viidessä ero oli 5–10 % RH ilman päällystystä olleessa laatan osassa. Päällystys kavensi eroa etenkin Tulilattia-puolella, jossa vertailtavat pisteet B1 (k250) ja D2 48 (k450) saavuttivat lähes saman kosteuden (kuva 4.5).



**Kuva 4.5.** Kosteuskuvaaja k250- ja k450-jaon keskellä päällystämättömällä ja päällystetyllä Tulilattia-puolella.

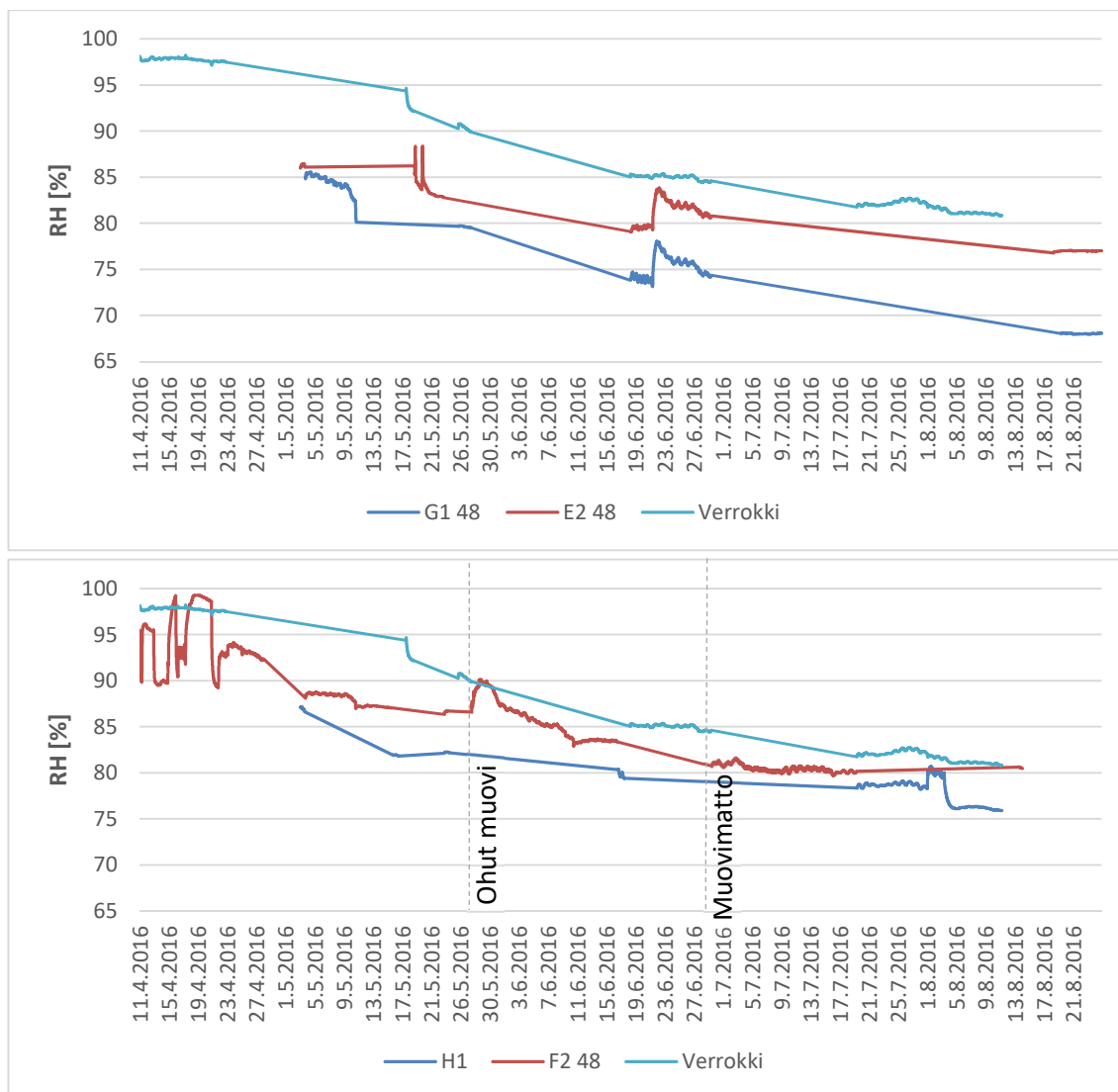
Lähempää putkea (etäisyys 50 mm) mitattaessa suuremmalla k-jaolla saatiin pienempiä kosteuden arvoja (vertailuparit A2-C1 ja A4-C3, kuva 4.6) eron ollessa molemmissa vertailupareissa 4 % RH:n luokkaa.



**Kuva 4.6.** Kosteuskuvaajat 50 mm:n etäisyydellä putkesta päällystämättömällä Tulilattia-puolella.

Epäloogiset mittaustulokset A- ja C-sektorien vertailussa saattavat johtua A-sektorin mittauspuiden läheisyydestä. Viereinen mittauspuiden saattaa estää kosteuden vapaan siirtymisen sivusuunnassa, jolloin betonin kuivuminen mittauspisteestä tapahtuu vain yhteen suuntaan.

Sähkövastuspuolella k-jaon merkitys jaon keskikohdan kuivumiseen (kuva 4.7) oli Tulilattia-puolta suurempi. Sielläkin päällystäminen kuitenkin kavensi eroa.

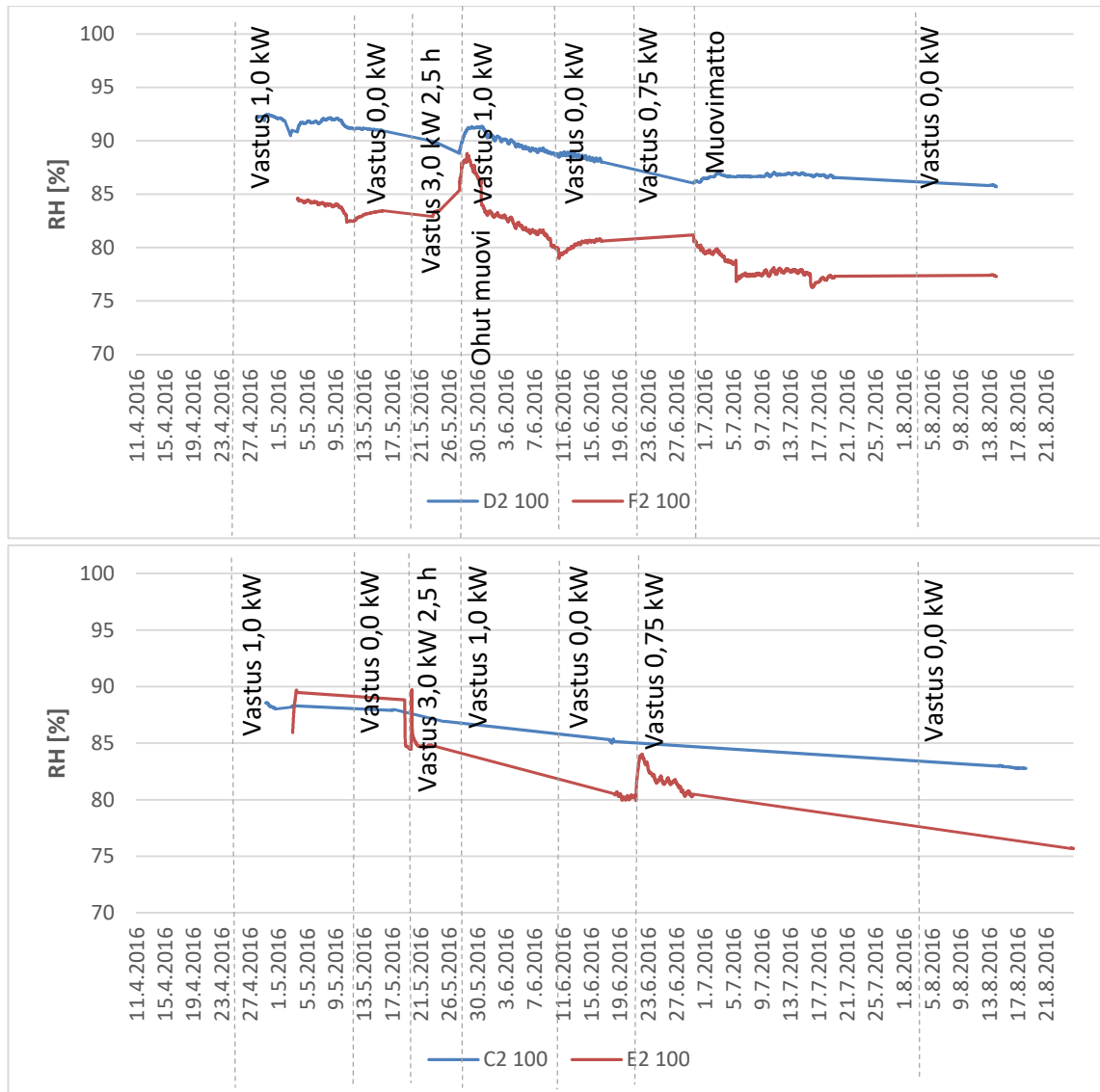


**Kuva 4.7.** Kosteuskuvaaja k250- ja k450-jaolla päällystämättömällä ja päällystetyllä sähkövastuspuolella putkijaon keskellä.

Ilman päällystystä suhteellinen kosteus oli k250-jaon alueella 7–10 % RH k450-aluetta alhaisempi. Päällystys kavensi eron 1–2 % RH:in.

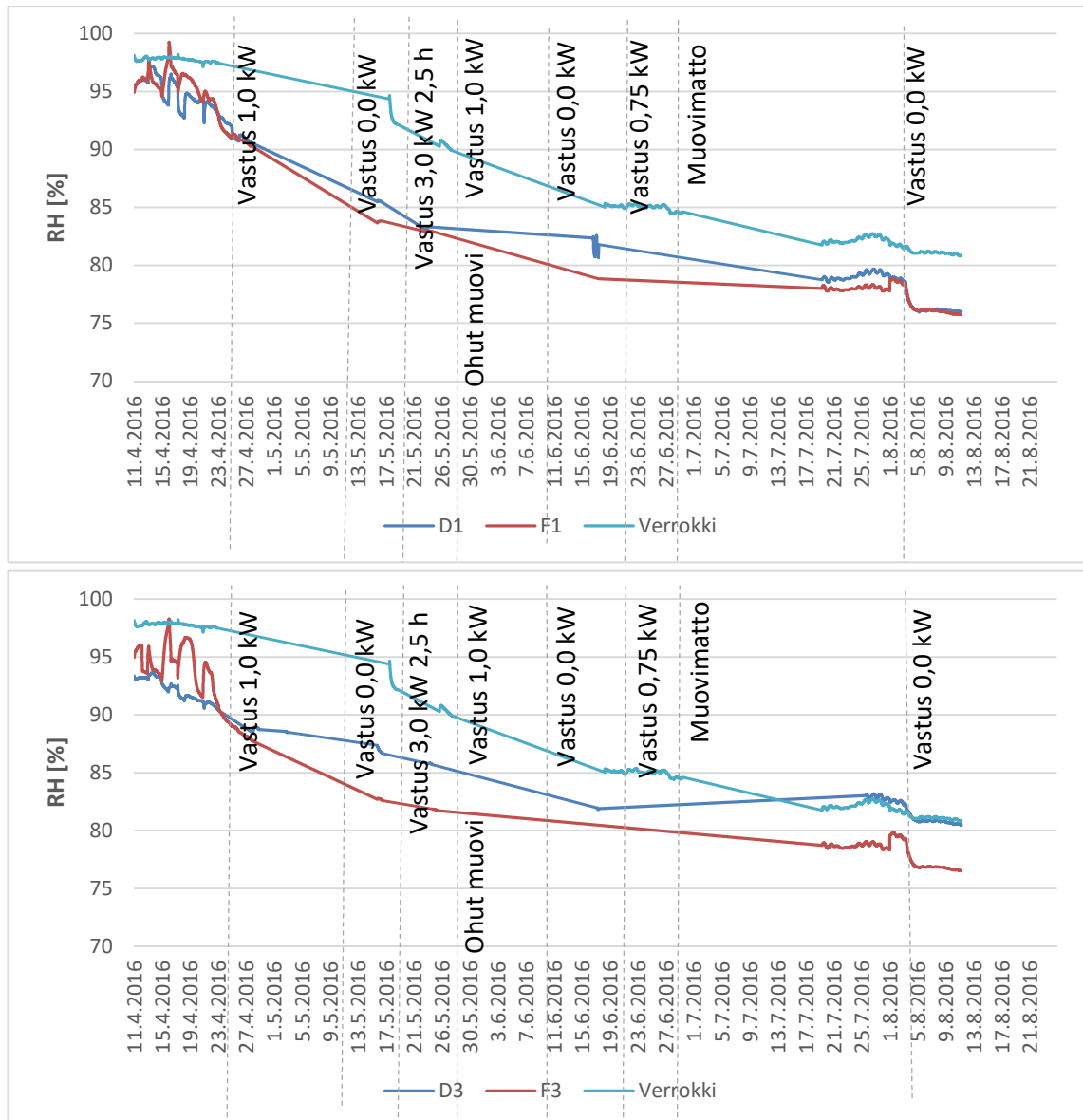
#### 4.1.6 Sähkövastuksen vaikutus

Laatta oli sähkövastuspuolella Tulilattia-puolta kuivempi kaikissa 12 vertailuparissa. Yhdeksässä parissa ero oli 4–9 % RH, loppuissa kolmessa parissa 0–3 % RH. Ero oli suurimmillaan 100 mm:n syvyydessä (kuva 4.8), jossa eron saattaa selittää sähkövastuslangan mittauspisteen ympäristöä kuivattava vaikutus.



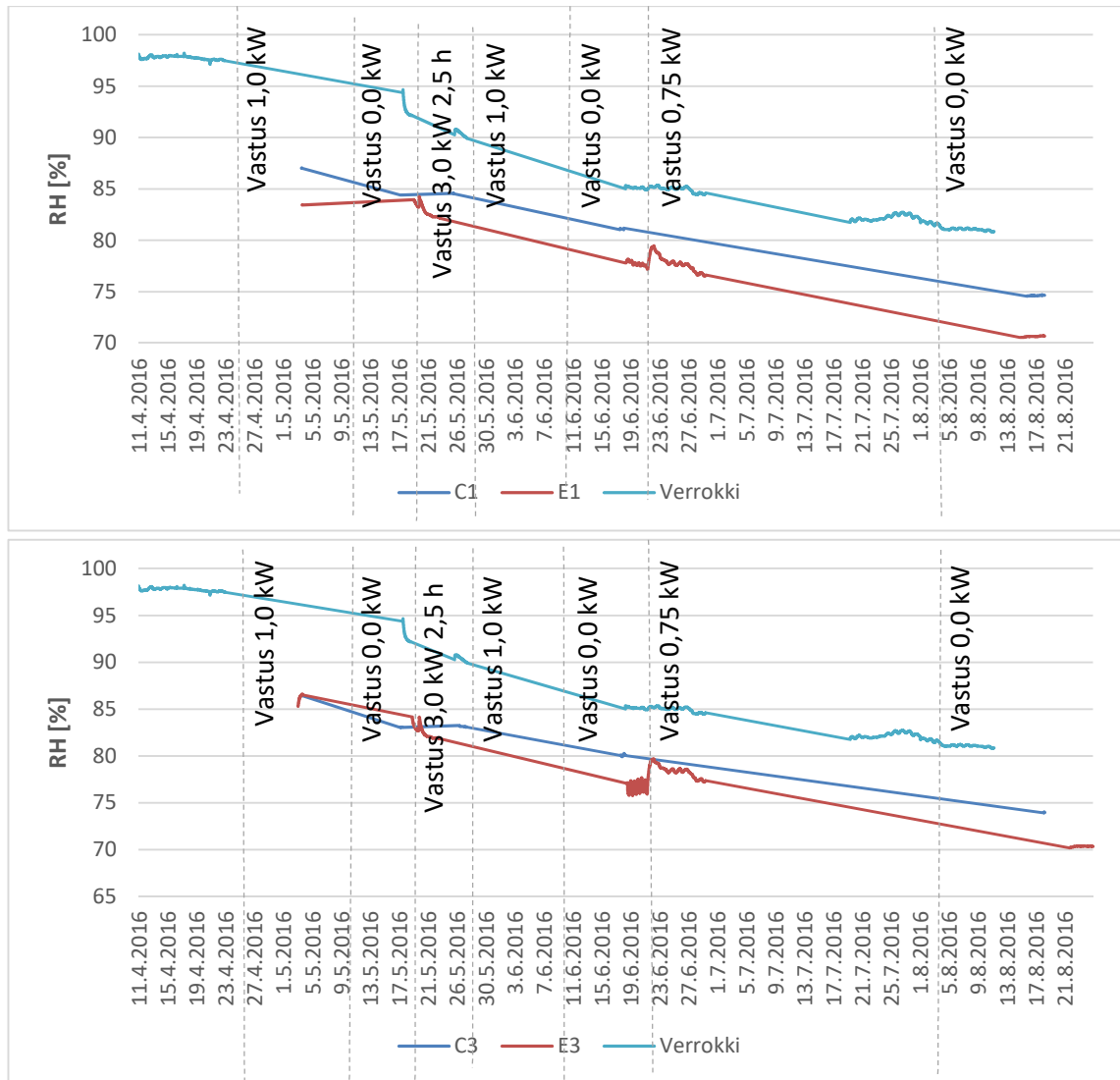
**Kuva 4.8.** Kosteuskuvaajat 100 mm:n syvyydessä päällystetyllä ja päällystämättömällä puolella.

Mittaustulokset 50 mm:n etäisyydellä putkesta heittelivät voimakkaasti. Päällystetyllä puolella (pisteet D1, F1, D3 ja F3, kuva 4.9) suhteellisten kosteuksien ero oli toisessa parissa 0 % RH ja toisessa parissa 4 % RH, vaikka kyseinen puoli on Tulilattia-putkien mutkan puolella, jolloin putkissa virtaavassa ilmassa ei ole merkittävää kosteuseroa. Ero ei selity myöskään mittausteknisillä seikoilla.



**Kuva 4.9.** Kosteuskuvaajat 50 mm:n etäisyydellä Tulilattia-putkesta päällystetyllä puolella (k450).

Sähkövastuspuolen putkea lähimmät mittauspisteet F1 ja F3 kuivuivat keskenään lähes identtisesti, mutta Tulilattia-puolella paluupuoli oli 4 % RH kuivempi. Päällystämättömällä puolella ero oli kahdessa vertailuparissa (C1-E1 ja C3-E3, kuva 4.10) 3–4 % RH kosteuksien ollessa lähes samat meno- ja paluupuolella.

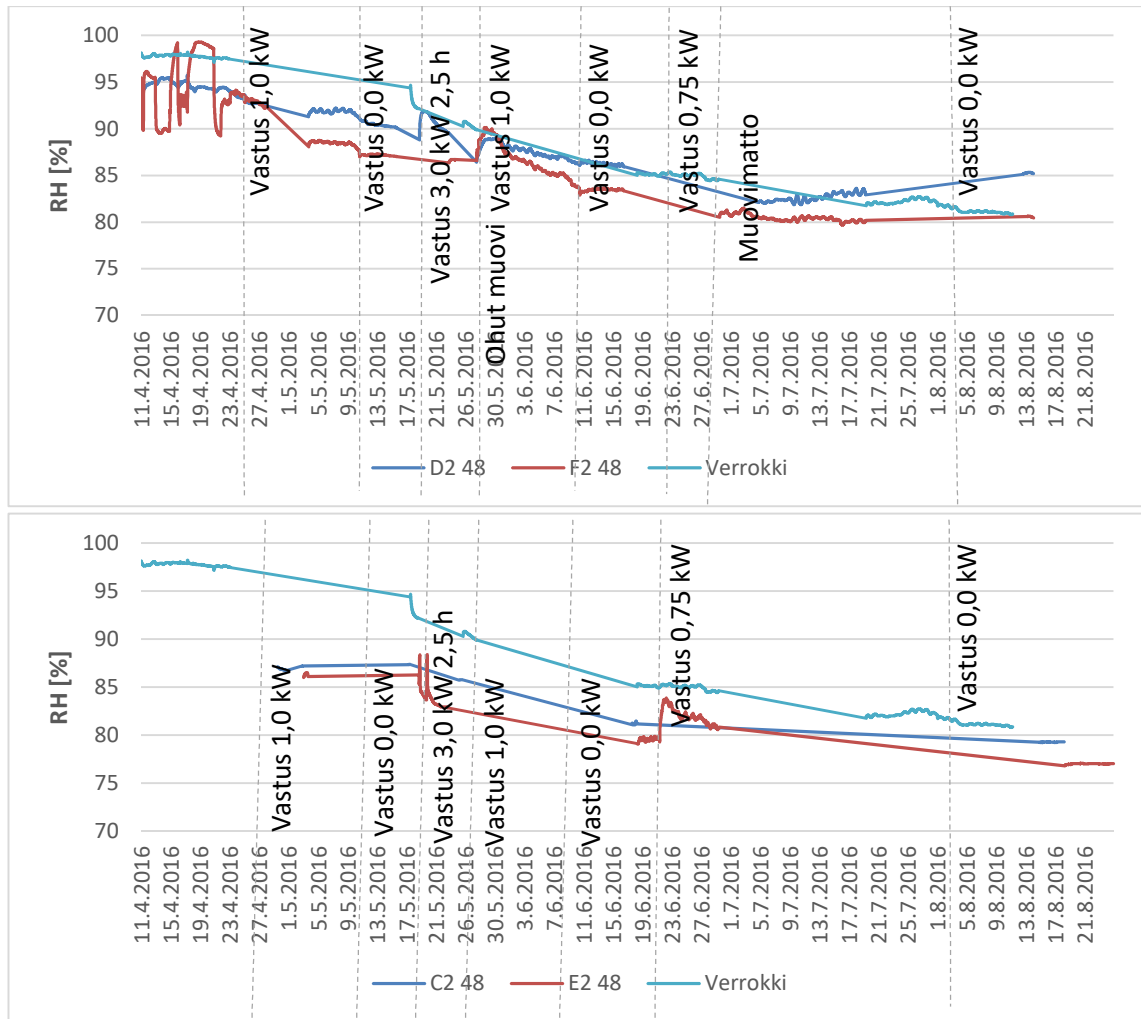


**Kuva 4.10.** Kosteuskuvaajat 50 mm:n etäisyydellä Tulilattia-putkesta päällystämättömällä puolella (k450).

50 mm:n etäisyydellä olevista mittauspisteistä D1:n mittaustulos on reilusti alakanttiin muihin tuloksiin nähden.

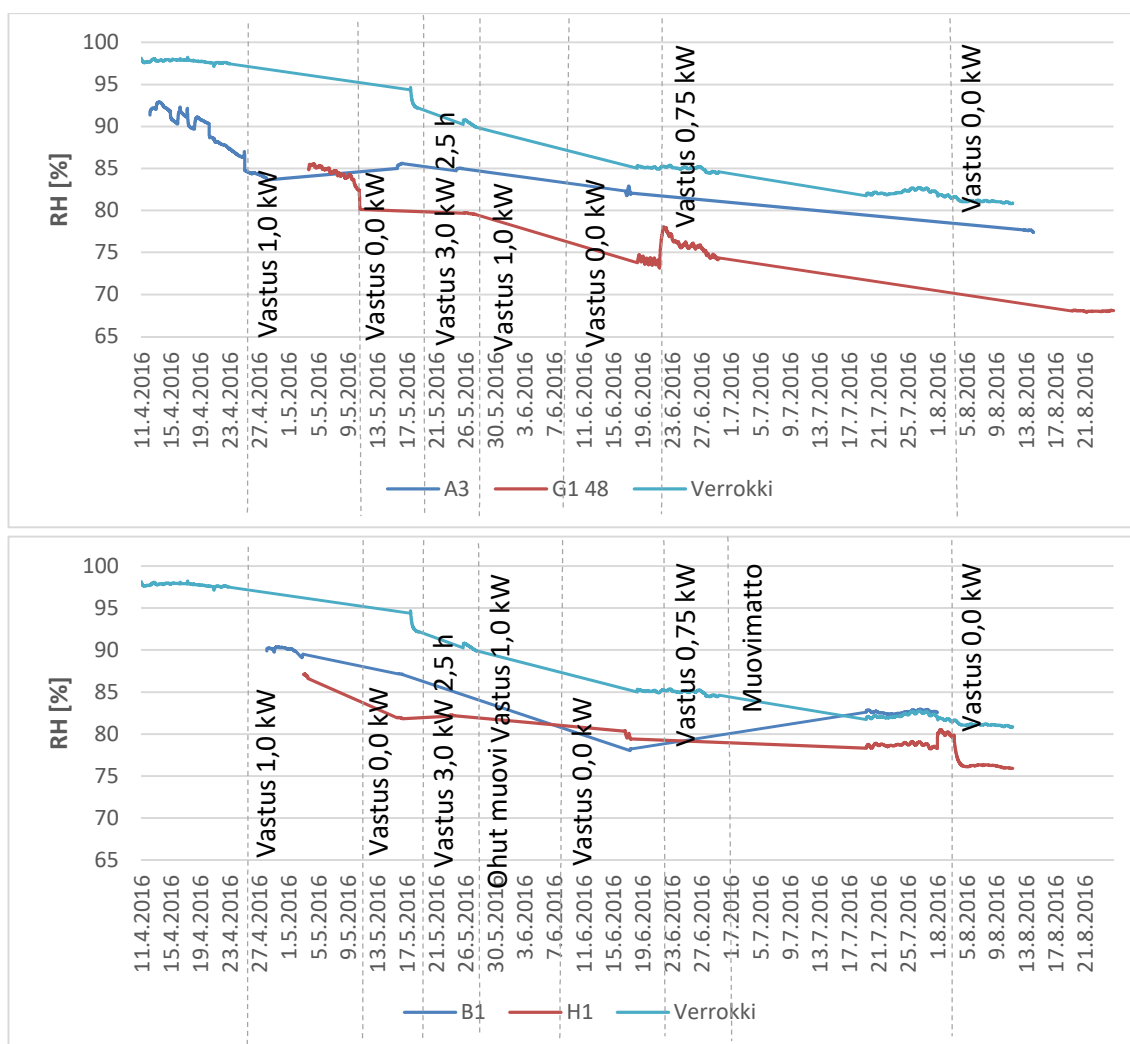
Putkijaon keskellä k450-alueella 48 millimetrin syvyydessä ero oli mittausten päättyessä päällystetyllä puolella 5 % RH ja päällystämättömällä 3 % RH (kuva 4.11). Päällystysten jälkeen kosteus lähti nousemaan Tulilattia-puolella, kun sähkövastuspuolella kosteus vaikiintui 80 % RH:in.





**Kuva 4.11.** Kosteuskuvaaja k450-jaon keskellä päällystetyllä ja päällystämättömällä puolella.

Kosteusero mittausten päättyessä k250-alueella oli päällystämättömällä osalla (vertailupari A3-G1 48) 8 ja päällystetyllä osalla (vertailupari B1-H1) 6 % RH. Kosteuskuvaajat on esitetty kuvassa 4.12.

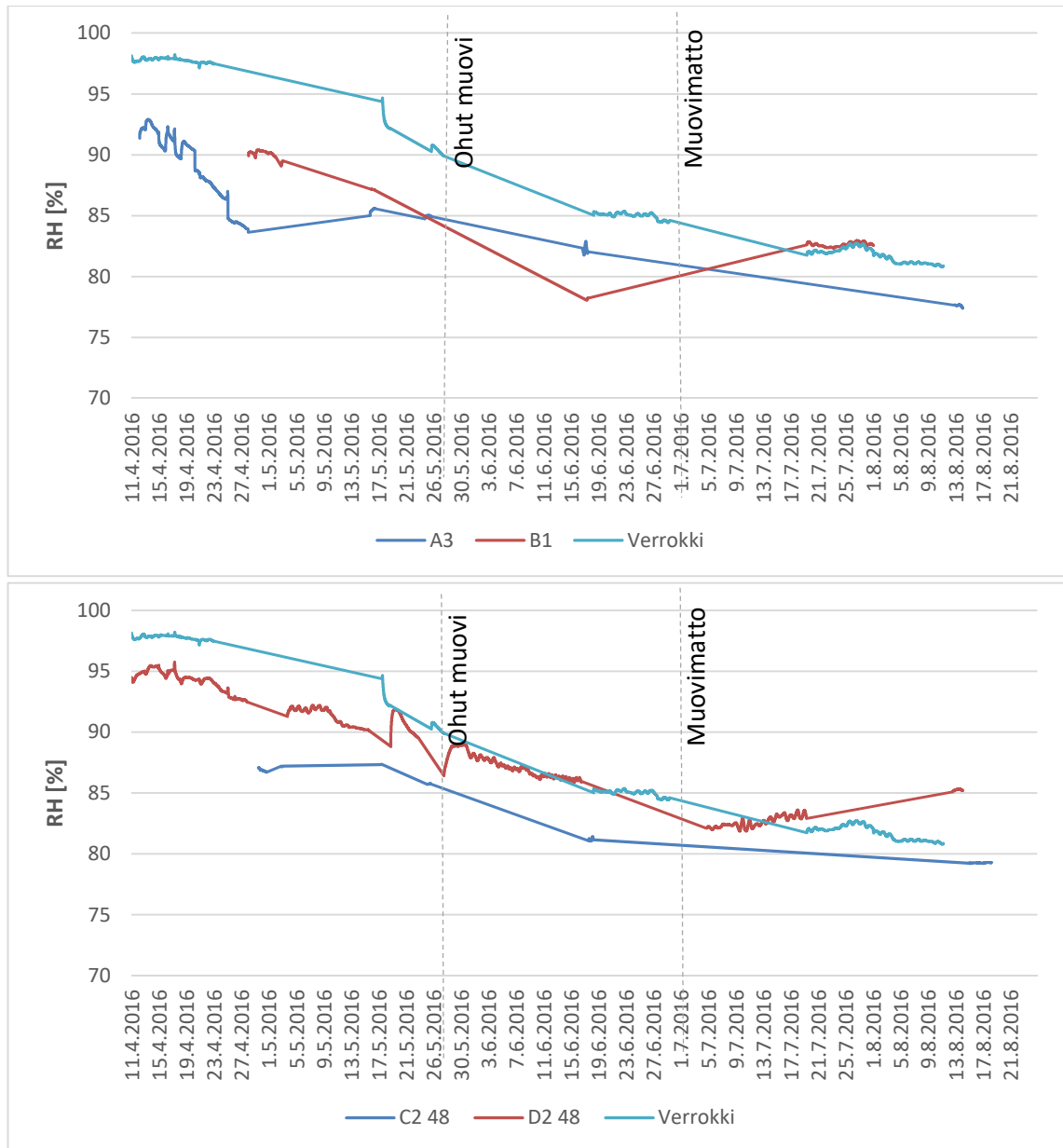


**Kuva 4.12.** Kosteuskuvaaja k250-jaon keskellä päällystetyllä ja päällystämättömällä puolella.

Päällystämättömällä osalla osan suuresta erosta saattaa selittää A-sektorin mittausputkien tiheys, joka estää osittain sivusuuntaista kosteusvirtaa.

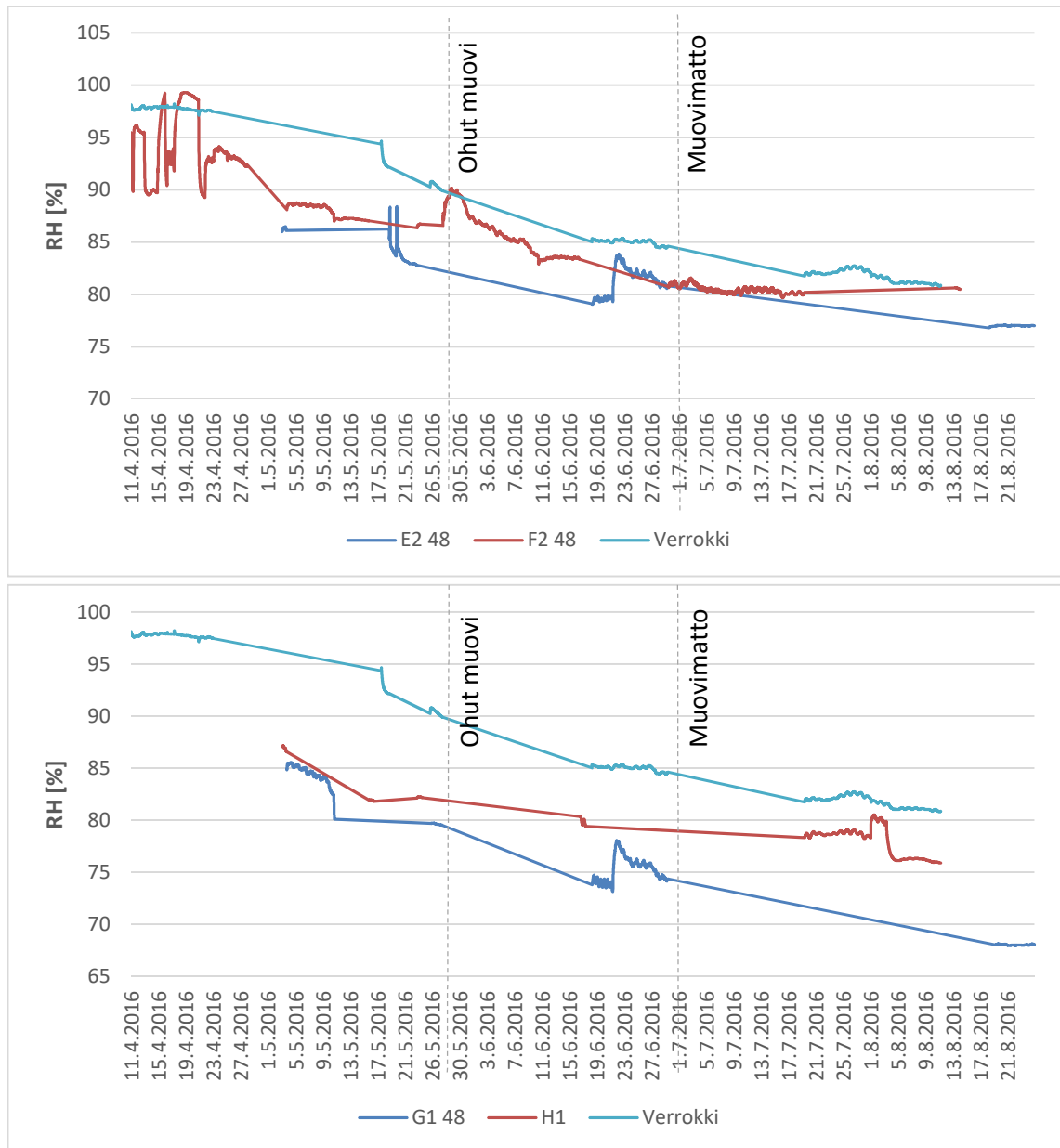
#### 4.1.7 Päällystysvaikutus

Laatta oli päällystämättömällä puolella päällystettyä kuivempi kaikissa 12 vertailupa-rissa, kuten ennakkoon oli odotettua. Tulilattia-puolella ero oli noin 5 % RH ja sähkövas-tuspuolella 4–7 % RH. Tulilattia-puolen kuvaajat ovat esitettyinä kuvassa 4.13. Päällystetyllä Tulilattia-puolella kosteus oli keskellä k-jakoa mittausten päätyttyä samaa luokkaa verrokkilaatan kanssa.



**Kuva 4.13.** Kosteuskuvaajat Tulilattia-puolelta k250- ja k450-jakojen keskeltä.

Kuvassa 4.14 on vastaavat kuvaajat sähkövastuspuolelta. Sähkövastuspuolella k450-alueella päällysteen alta mitattu kosteus oli mittausten päättyessä myös samaa luokkaa verrokkilaatan kanssa. Vastaavassa kohdassa k250-alueella ero verrokkilaattaan oli 5 % RH.

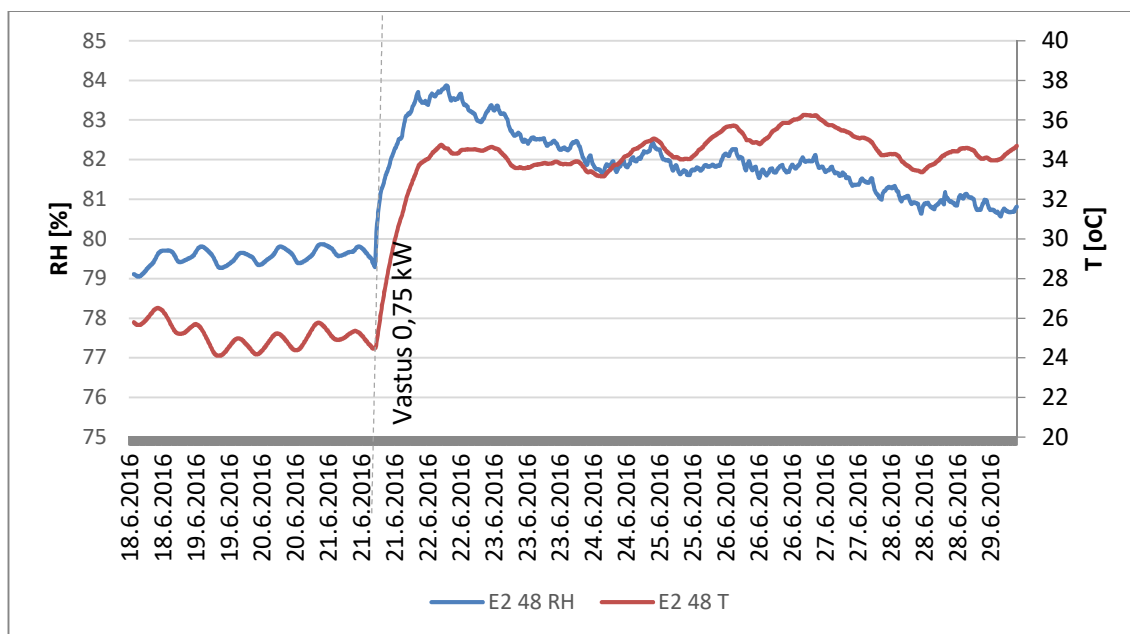


**Kuva 4.14.** Kosteuskuvaajat sähkövastuspuolelta k250- ja k450-jakojen keskeltä.

Tulilattia-puolella ero oli suurempi k450-alueella. Sähkövastuspuolella tilanne oli päinvastainen. Ohut muovipäällyste ei juuri vaikuttanut laatan kuivumiseen. Muovimattolla sen sijaan oli selvä vaikutus kuivumiseen, vaikka se asennettiin laatan ollessa jo melko kuiva (~ 80 % RH). Kosteampi laatta olisi saattanut jatkaa kuivumistaan myös päällystettynä putkiston kautta. Pidemmällä mittausjaksolla suhteellinen kosteus olisi myös voinut kääntyä laskuun. Suuremmalla tutkittavalla pinta-alalla päällystysten olisi voinut tehdä usealle alueelle eri ajankohtina, jolloin päällystysten vaikutusta olisi voinut tarkastella eri kosteuksissa. Järjestelmän toimivuutta onkin tarkoitus tutkia vielä työmaaolosuhteissa, jolloin käytettävissä on suurempi pinta-ala.

#### 4.1.8 Mittauslämpötilan vaikutus

Suhteellisen kosteuden mittausulos oli voimakkaasti riippuvainen mittauksen hetkellä vallinneesta lämpötilasta. 10 °C:n nousu mittauslämpötilassa nosti suhteellisen kosteuden mittauslukemaa noin 2–4 % RH. Esimerkki äkillisen lämmittämisen aiheuttamasta kosteuskeman noususta on esitetty kuvassa 4.15.

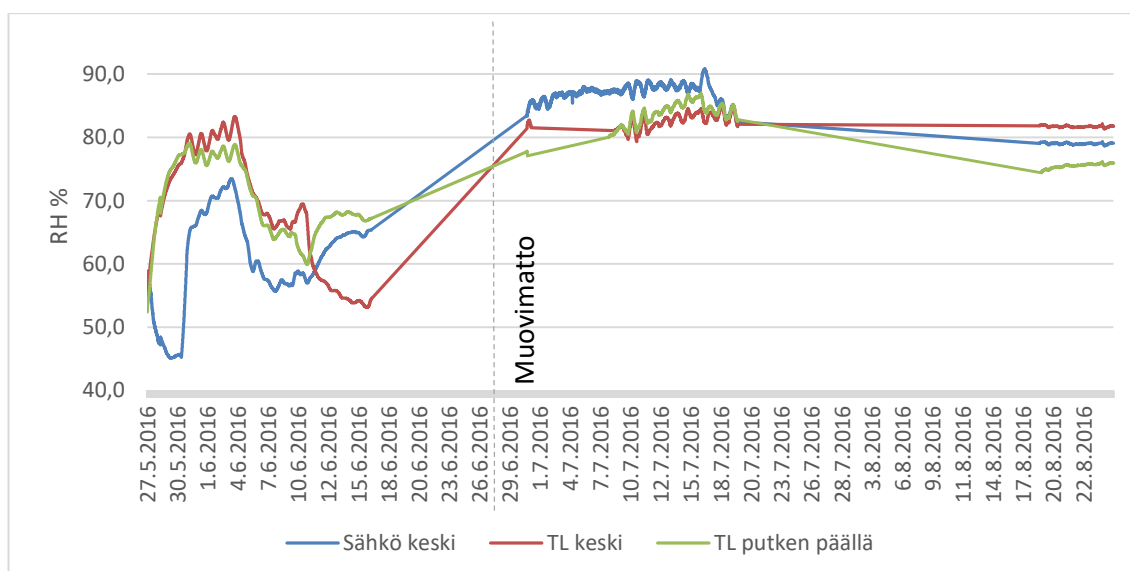


**Kuva 4.15.** Mittauspisteen E2 48 lämpötila- ja kosteuskuvaaja 11 vuorokauden ajalta.

Kuvaajassa näkyvä lämpötilan nousu aiheutui siitä, kun sähkövastus laitettiin päälle 0,75 kW keskimääräisellä teholla. Vastaava lämpötilan ja suhteellisen kosteuden nousu näkyy samalla ajanhetkellä kaikissa sähkövastuspuolen mittauspisteissä. Lämmitettäessä laattaa nopeasti nousee myös suhteellisen kosteuden lukema äkillisesti, mutta alkaa hitaasti laskemaan päivien kuluessa lämpötilan pysyessä kuitenkin samana. Erityisesti sähkövastuspuolella laatta lämpeni mittausjakson aikana ajoittain äkillisesti, kun sähkövastus laitettiin välillä päälle ja välillä pois päältä. Todellista tilannetta vastaavien kosteuskemien saamiseksi laatan lämpötila tasattiin +20...+25 °C:een aina mittausulosten kirjaamisen ajaksi.

#### 4.1.9 Kosteudenkehitys päällysteen ja betonin välissä

Mittausten loppuvaiheessa muovimaton alta mitatut suhteelliset kosteudet olivat 2 % RH betonin sisältä 25 mm:n syvyydestä mitattuja alhaisempia. Muovimaton asennuksen jälkeen arvot nousivat 0–15 % RH korkeammiksi ohueen muoviin verrattuna. Sähkövastuspuolella maton alta mitattu arvo oli Tulilattia-puolta korkeampi. Kuvaaja kosteuden kehityksestä muovin ja maton alla muovin asennuksesta lähtien on kuvassa 4.16.



**Kuva 4.16.** Kosteuskuvaaja päällysteen alta sähkövastus- ja Tulilattia-puolen k450-jaon keskeltä sekä Tulilattia-puolen putken päältä.

Ohuen muovin ollessa asennettuna päällyste nousi välillä muutaman senttimetrin irti betonista muovin alla ja huonetilassa vallinneen ilmanpaine-eron vuoksi, joka pienensi mitattua kosteuskokemaa. Muovimaton asennuksen jälkeen ongelmaa ei enää ollut, jolloin mitatut suhteellisen kosteuden arvot olivat korkeammat. Suhteellisten kosteuksien nousu kuvaajassa jo ennen muovimaton asennusta selittyy mittaushetkien välisellä interpoloinnilla.

#### 4.1.10 Näytepalamittaus

Laatasta otettiin näytepalat pinnasta neljästä eri kohdasta 27.6.2016 laatan ollessa 87 päivän ikäinen: päällystämättömältä Tulilattia-puolelta, päällystetyltä Tulilattia-puolelta, päällystämättömältä sähkövastuspuolelta ja päällystetyltä sähkövastuspuolelta. Ohut muovi oli tuolloin ollut paikallaan 31 päivää. Näytepalamittauksen tulokset ovat esitettynä taulukossa 4.2. Kustakin kohdasta pistettiin näytteet kahteen koeputkeen, joiden antamista tuloksista laskettiin keskiarvo.

**Taulukko 4.2.** Näytepalamittauksen mittaustulokset.

Sektori	Sähkövastus	Päällystys	RH (%)	T (°C)
C	Ei	Ei	48	21,6
D	Ei	Kyllä	69	21,3
E	Kyllä	Ei	42	21,3
F	Kyllä	Kyllä	60	21,3

Ohuellakin muovilla oli nähtävissä selkeä ero päällystetyn ja päällystämättömän osan alta otetuissa näytteissä. Tulilattia-puolella ero oli 21 % RH ja sähkövastuspuolella 18 % RH.

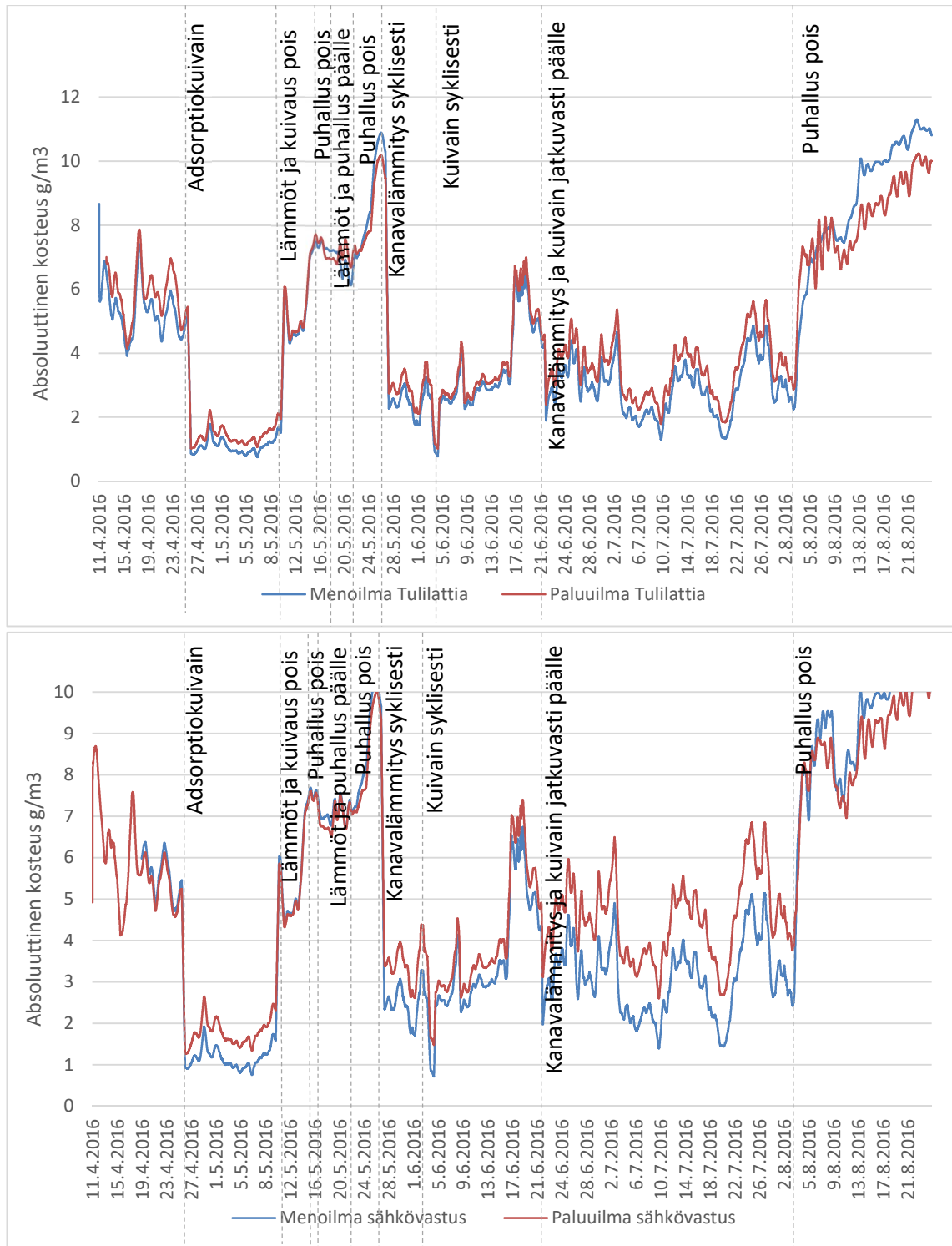
Myös sähkövastuksen käytön aiheuttama ero oli merkitsevä; Päällystetyllä osalla suhteellisen kosteuden ero oli 9 % RH ja päällystämättömällä osalla 6 % RH. Muovin alta saadut tulokset olivat linjassa muiden mittausten kanssa.

## **4.2 Kuivatusputkiston mittaustulokset**

Tulilattia- ja sähkövastuspuolen meno- ja paluuilmaa mittaavien antureiden ja virtausnopeutta mittaavan anemometrin antamista arvoista pystytään laskemaan putkien kautta siirtyvä kosteusvirta kaavalla (2.14). Arvot korjattiin mittauksen päätteeksi tehdyn kalibroinnin mukaan sillä oletuksella, että arvojen poikkeama todellisesta on kasvanut nopeammin mittausten alkuvaiheessa, josta muutosnopeus on hidastunut mittausten edetessä. Tulilattia-putkien piirit kulkivat sekä päällystämättömän että päällystetyn puolen läpi, joten eri puolien putkien kautta välittyneestä kosteusvirrasta ei ole tämän tutkimuksen puitteissa dataa käytettävissä.

### **4.2.1 Meno- ja paluupuolen absoluuttiset kosteudet**

Absoluuttisen kosteuden arvot meno- ja paluupuolella seurasivat toisiaan. Niiden erotus oli Tulilattia-puolella koko mittausjakson ajan alle  $1 \text{ g/m}^3$  ja sähkövastuspuolella suurimmillaan hieman enemmän, kuten näkyy kuvasta 4.17.



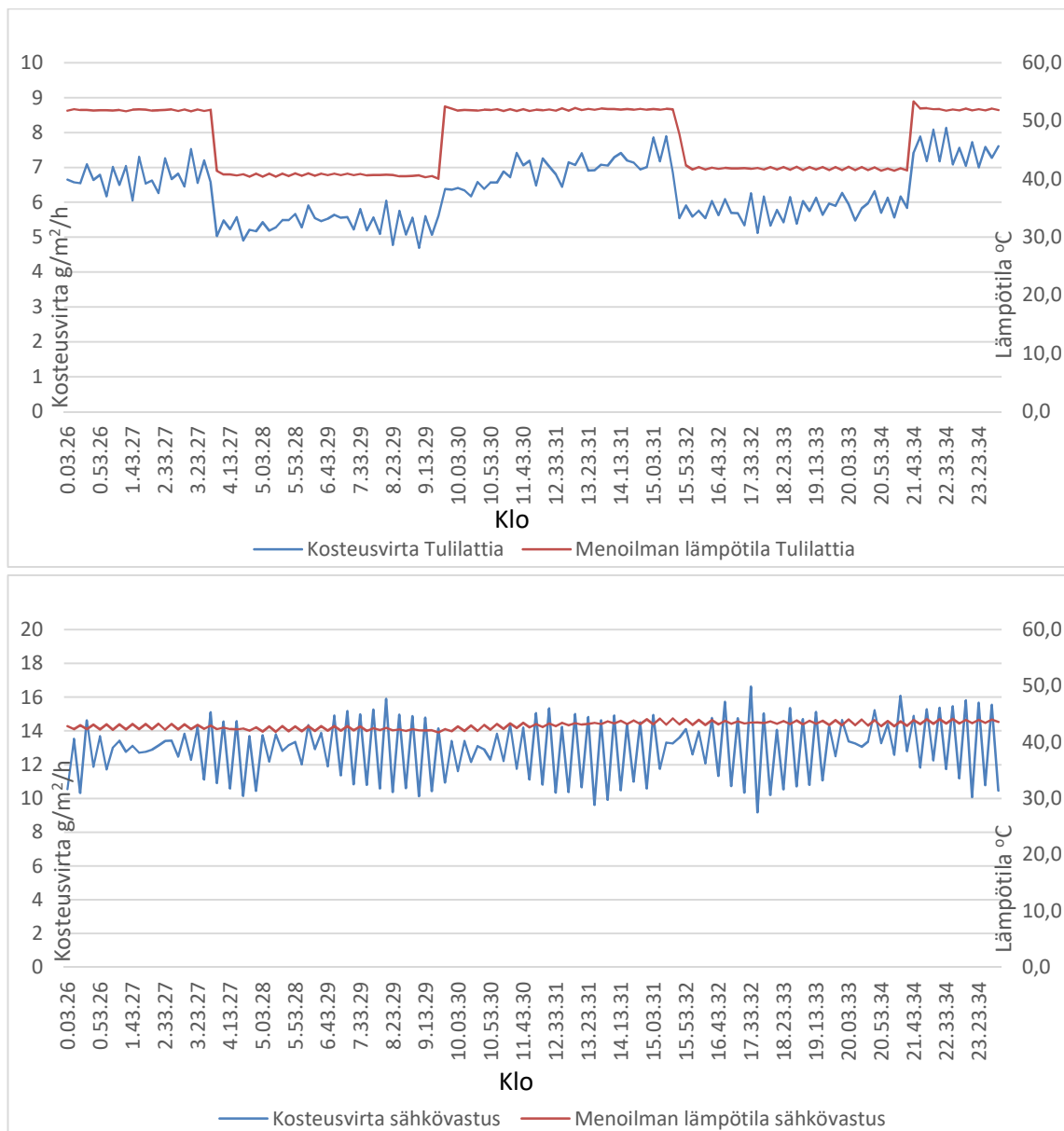
**Kuva 4.17.** Meno- ja paluuilman absoluuttiset kosteudet Tulilattia- ja sähkövastuspuolella.

Erotus selittyy puhallusilman laadusta keräämällä kosteudella. Kosteusvirta on suoraan verrannollinen erotuksen suuruuteen.



#### 4.2.2 Kanavalämmittimen vaikutus

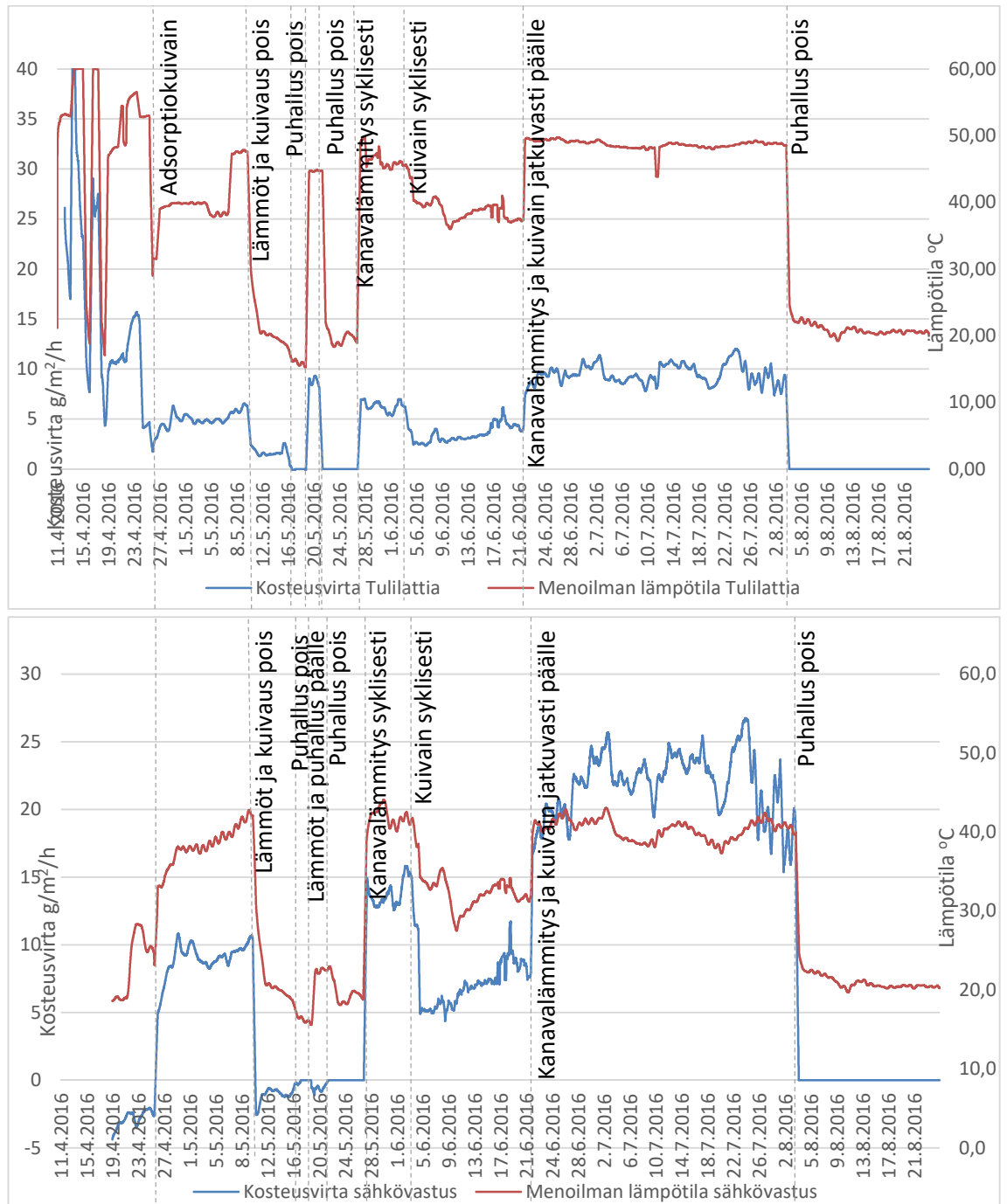
Menoilman lämmitykseen käytetty VEAB-lämmitin kasvatti kosteusvirtaa laatasta ulos. Kuvasta 4.18 nähdään, että lämmittimen ollessa ajastettuna kuuden tunnin sykleissä ja kuivaimen ollessa jatkuvasti päällä 28.5.–21.6.2016 kosteusvirta oli Tulilattia-puolella 7–8 g/m<sup>2</sup>/h lämmittimen ollessa päällä ja 5–6 g/m<sup>2</sup>/h lämmittimen ollessa pois päältä. Lämpötilaero jaksojen välillä oli noin 10 °C. Lämpötila oli ilman lämmitintäkin noin +40 °C, joten kuivain myös lämmitti menoilmaa.



**Kuva 4.18.** Menoilman lämpötilan ja kosteusvirran kuvaajat vuorokauden ajalta 29.5.2016. Kuvaajissa näkyy selkeästi tuolloin käytössä ollut kanavalämmittimen kuuden tunnin sykli.

Tulilattia- ja sähkövastuspuolen paluuilmat sekoittuvat kuivaimessa. Sähkövastuspuoleen kanavalämmittimen syklisellä käytöllä ei kuitenkaan ollut vaikutusta.

Kanavalämmittimen vaikutus on nähtävissä myös pidemmän aikajakson mittaustuloksia tarkastellessa. Kosteusvirran ja menoilman lämpötilan kuvaajissa (kuva 4.19) on havaittavissa selvä korrelaatio.

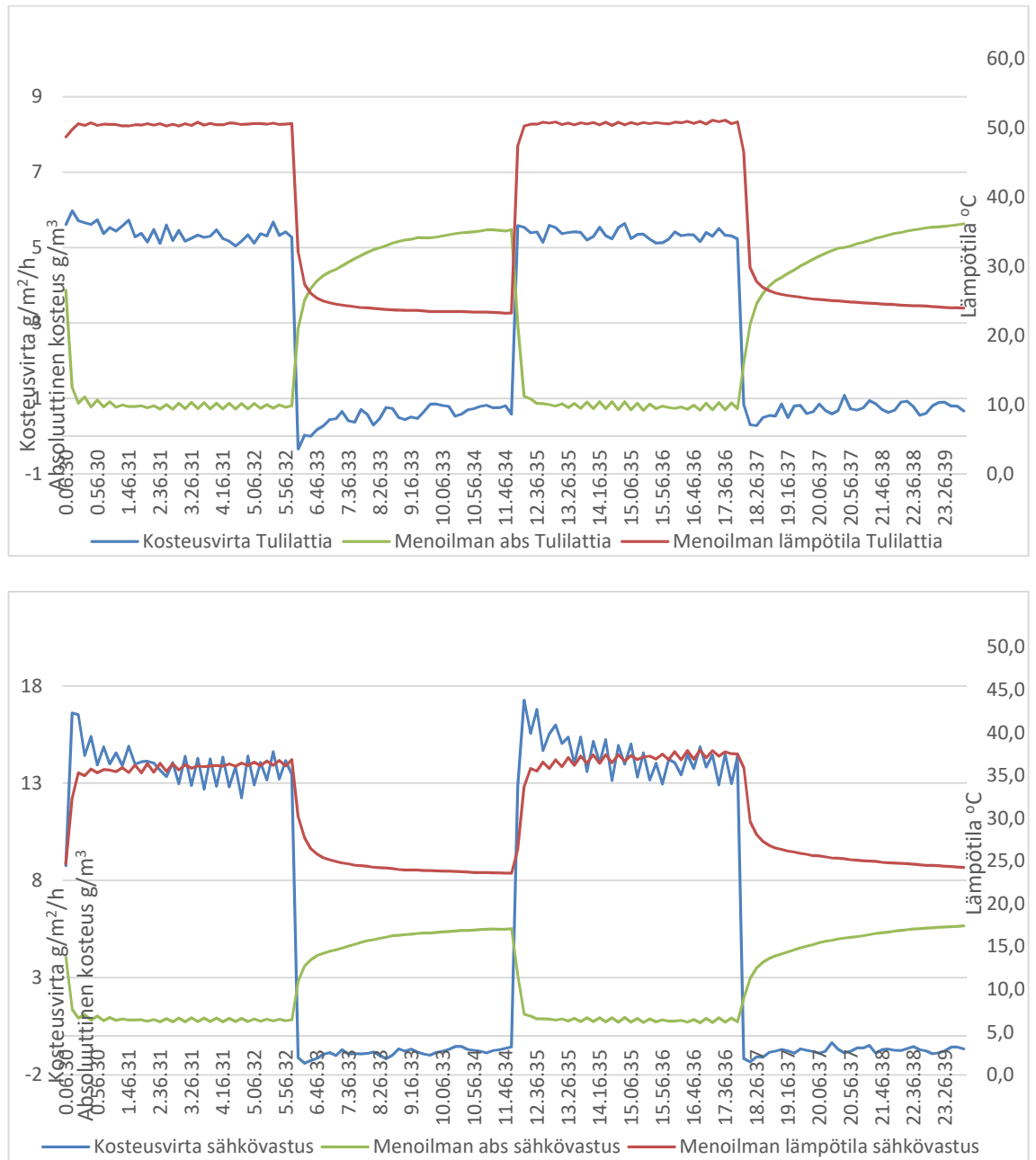


**Kuva 4.19.** Kosteusvirran ja menoilman lämpötilan kuvaajat koko mittausjaksolta Tulilattia- ja sähkövastuspuolelta.

Kuvaajan lämpötilan ja kosteusvirran arvot ovat juoksevia keskiarvoja aina 12 tunnin ajalta niin, että kuuden tunnin syklien aiheuttama kohina mittausdataan saadaan häivytettyä. Keskiarvon käyttämisen vaikutus kuvaajiin on esitelty liitteessä 4.

### 4.2.3 Adsorptiokuivaimen vaikutus

Kuivaimen vaikutus kosteusvirtaan oli lämmitintä suurempi. Sähkövastuspuoli oli erityisen riippuvainen kuivaimesta, sillä kyseisen puolen kosteusvirta oli tyypillisesti negatiivinen kuivaimen ollessa pois päältä. Toisin sanoen laattaan puhallettu ilma vain vei kosteutta laattaan. Vaikutus näkyy vuorokauden ajanjaksolla kuvassa 4.20.



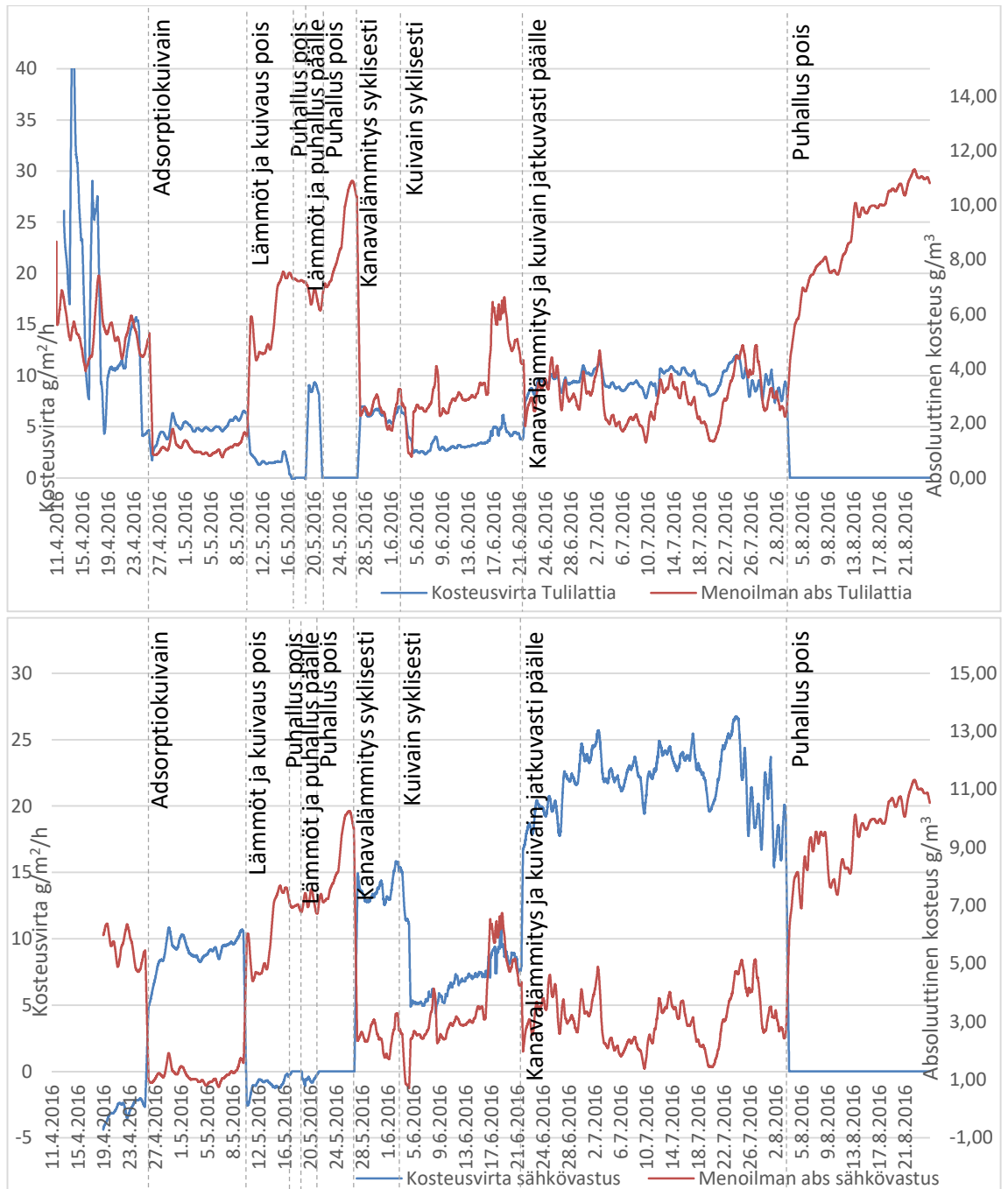
**Kuva 4.20.** Menoilman absoluuttisen kosteuden ja lämpötilan sekä kosteusvirran kuvaajat yhden vuorokauden ajalta 12.6.2016. Kanavalämmitin ja kuivain olivat samassa kuuden tunnin syklissä.

Tulilattia-puolellakin kosteusvirta painui alle 1  $\text{g/m}^2/\text{h}$  lämmittimen ja kuivaimen ollessa pois päältä. Tulilattia-puolella kosteusvirta nousi kuivaimella ja lämmittimellä 5–6

$\text{g/m}^2/\text{h}$ :an ja sähkövastuspuolella todella korkeisiin  $13\text{--}17 \text{ g/m}^2/\text{h}$ :n arvoihin. Lämpötila-amplitudi oli Tulilattia-puolella noin  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ja sähkövastuspuolella noin  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kanavälämmitin lämmitti ainoastaan Tulilattia-puolelle menevää ilmaa. Menoilman absoluuttisen kosteuden amplitudi oli molemmilla puolilla  $4,5 \text{ g/m}^3$  verrattaessa arvoja kuivaimen kanssa ja ilman sitä.

#### **4.2.4 Menoilman absoluuttisen kosteuden vaikutus**

Tarkasteltaessa koko mittausjaksoa menoilman absoluuttisen kosteuden ja kosteusvirran välinen negatiivinen korrelaatio näkyy suuremmissa muutoksissa, esimerkiksi kun lämmitys ja kuivaus on otettu pois päältä tai laitettu ajastimella toimimaan sykleissä. Pienemmissä muutoksissa, jotka johtuvat normaalista tilastollisesta kohinasta tai muutoksista ympäröivissä olosuhteissa, korrelaatio on positiivinen; menoilman absoluuttisen kosteuden kasvaessa myös kosteusvirta on suurempi. Menoilman absoluuttisen kosteuden ja kosteusvirran kuvaajat on esitetty kuvassa 4.21.



**Kuva 4.21.** Kosteusvirran ja menoilman absoluuttisen kosteuden kuvaajat Tulilattia- ja sähkövastuspuolella koko mittausjaksolta.

Pienemmissä muutoksissa olosuhteet ovat vaikuttaneet paluuilmaan menoilmaa voimakkaammin (kuva 4.17), mikä on kasvattanut meno- ja paluuilman erotusta ja näin ollen myös kosteusvirran suuruutta.

### 4.2.5 Syklisyyden vaikutus

Lämmittimen ollessa päällä syklisesti kuuden tunnin jaksoissa (28.5.–4.6.) keskimääräinen kosteusvirta oli Tulilattia-puolella noin 6–7 g/m<sup>2</sup>/h. Kun kuivain laitettiin saman ajastimen taakse (4.6.–21.6.), kosteusvirta putosi arvoon 3–4 g/m<sup>2</sup>/h. Molempien ollessa jatkuvasti päällä kosteusvirta oli 8–11 g/m<sup>2</sup>/h. Sähkövastuspuolella kosteusvirta oli kuivaimen ollessa jatkuvasti päällä noin 15–25 g/m<sup>2</sup>/h ja kuivaimen ollessa syklissä 5–10 g/m<sup>2</sup>/h. Tulilattia-putkien kautta saadun kosteusvirran arvot eri yhdistelmillä on koottu taulukkoon 4.3.

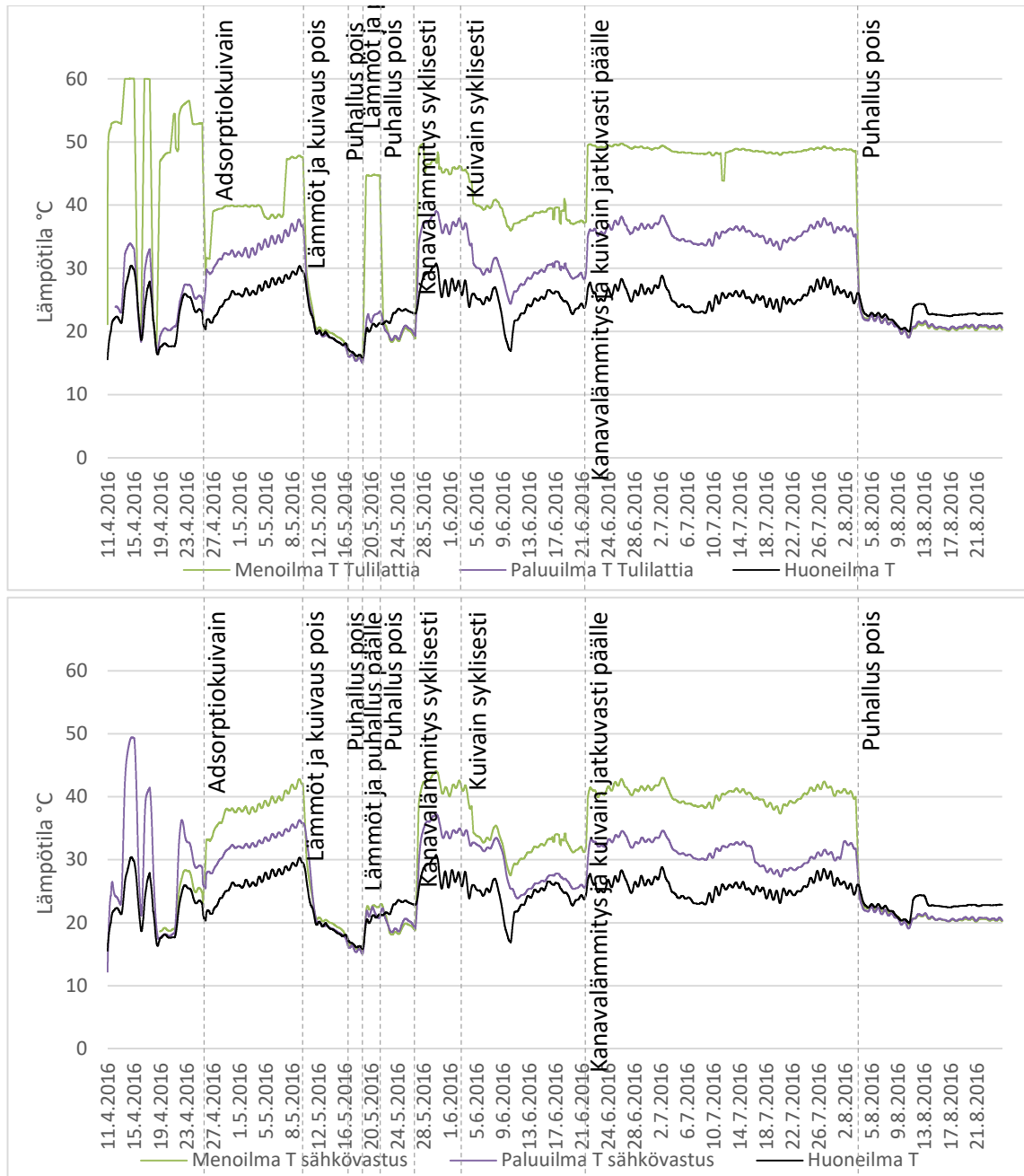
**Taulukko 4.3.** Yhteenvedo kosteusvirroista eri kombinaatioilla.

Kanavalämmitin	Kuivain	Puoli	Kosteusvirta (g/m <sup>2</sup> /h)
Päällä	Päällä	Tulilattia	8–11
Syklinen 6 h	Päällä	Tulilattia	6–7
Syklinen 6 h	Syklinen 6 h	Tulilattia	3–4
Pois	Päällä	Sähkövastus	15–25
Pois	Syklinen 6 h	Sähkövastus	5–10

Syklisyydestä ei siis ollut toivottua hyötyä laatan kuivatuksessa putkiston kautta. Sähkövastus vaikutti kosteusvirran suuruuteen erityisesti kuivaimen ollessa jatkuvasti päällä. Ero Tulilattia-puoleen oli suurimmillaan 15 g/m<sup>2</sup>/h. Ero on suuri, mutta toisaalta linjassa betonin sisältä mitattuihin arvoihin, joissa laatta oli sähkövastuspuolella Tulilattia-puolta kuivempi. Sähkövastus saattaa myös kiihdyttää laatan kuivumista pinnan kautta.

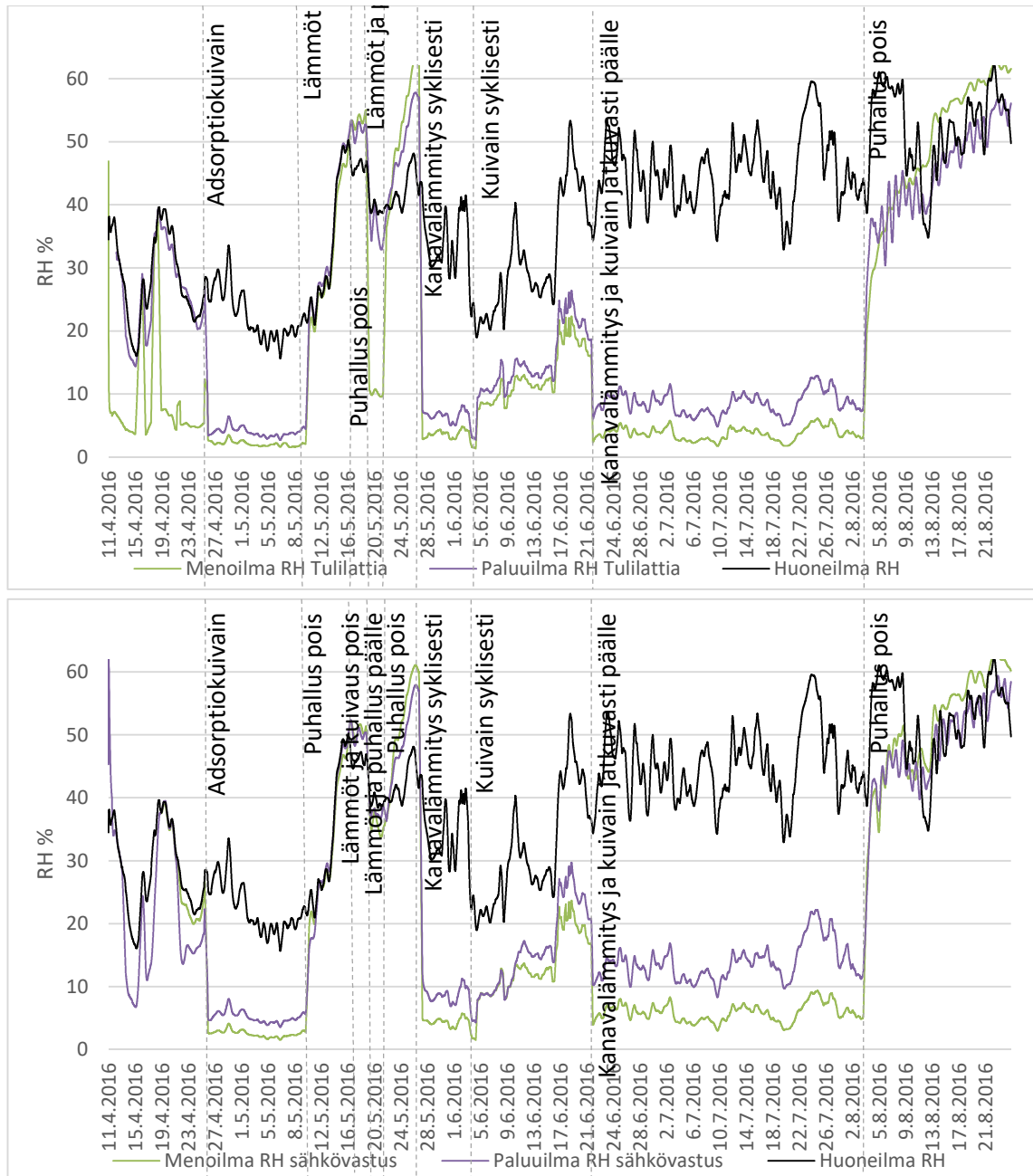
### 4.2.6 Huoneilman olosuhteiden vaikutus

Yksi meno- ja paluuilman mittausravoihin vaikuttava tekijä oli luonnollisesti huoneilman olosuhteet, joita myös mitattiin yhdellä anturilla. Molempien puolien lämpötilakuvaajat on esitelty kuvassa 4.22. Tulilattia-puolen menoilman lämpötilaan huoneilmalla ei juuri ollut vaikutusta kanavalämmittimen ollessa päällä, mutta paluuilmassa korrelaatio näkyy selvästi, kuten myös menoilmassa lämmittimen ollessa pois päältä. Sähkövastuspuolella, jonka menoilmaa kanavalämmitin ei lämmittänyt, huoneilman vaikutus näkyy sekä meno- että paluuilman lämpötilassa. Kuvaajat seuraavat hyvin tarkkaan huoneilman vuorokautisia ja muita vaihteluja. Muutokset lämpötilassa olivat myös samaa suuruusluokkaa kaikissa mittauksissa. Puhaltimen, lämmittimen ja kuivaimen ollessa pois päältä meno- ja paluupuolen antureiden antama lämpötila tasaantui samalle tasolle huoneilman kanssa.



**Kuva 4.22.** Meno-, paluu- ja huoneilman lämpötilakuvaajat Tulilattia- ja sähkövastus-puolella.

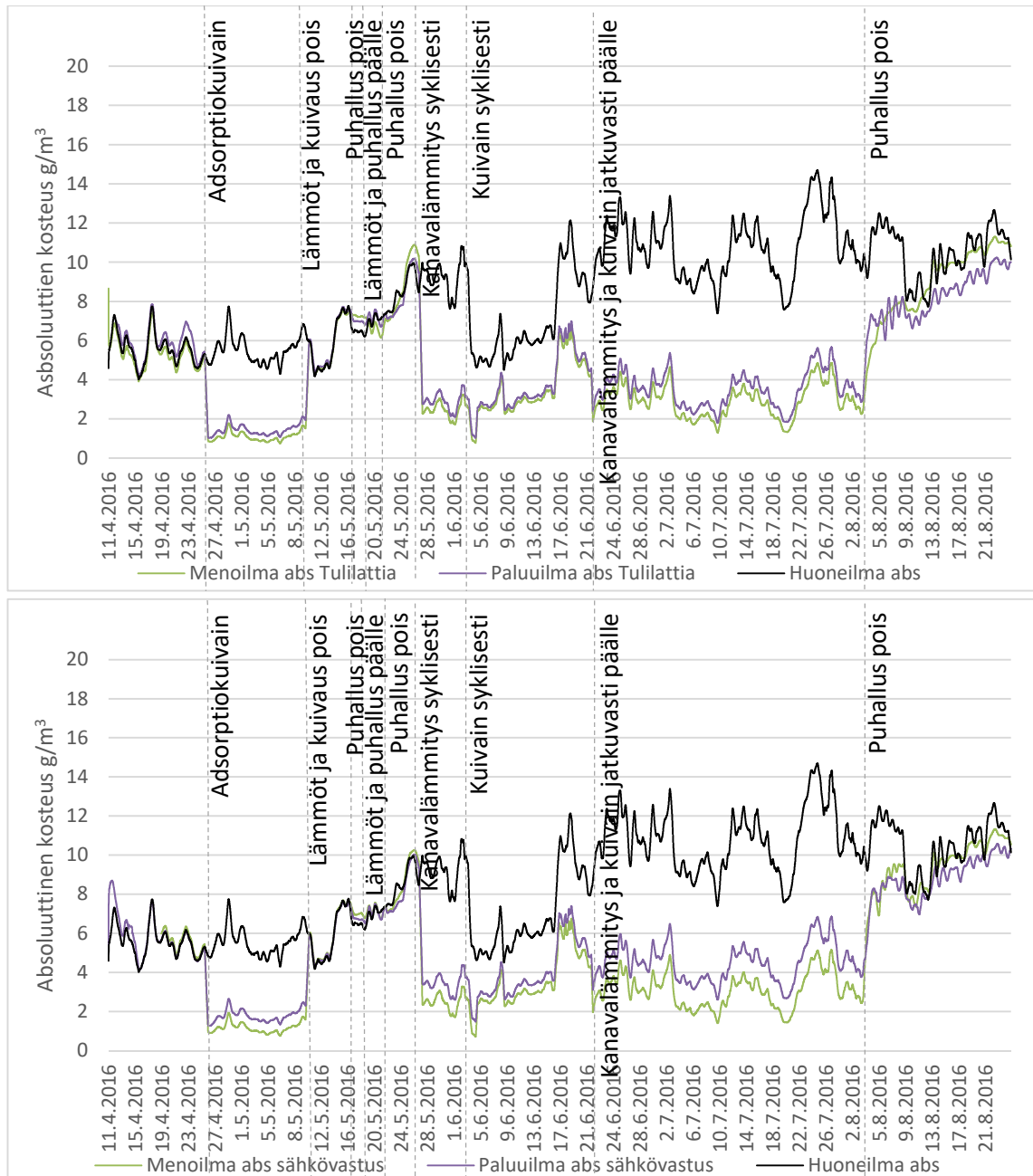
Huoneilman suhteellinen kosteus vaikutti meno- ja paluuilman kosteuksiin vähemmän. Meno-, paluu- ja huoneilman kosteudet on esitetty kuvassa 4.23. Korrelaatio on selvästi nähtävissä, mutta meno- ja paluuilman suhteellisen kosteuden muutokset ovat huoneilmaa pienempiä, suuruusluokaltaan noin kolmasosa huoneilman muutoksesta. Ero johtuu siitä, että putkessa virtaava ilma on huoneilmaa lämpimämpää, jolloin yhtä suuri absoluuttisen kosteuden muutos näkyy suuremman kyllästyskosteuspitoisuuden omaavassa ilmassa pienempänä.



**Kuva 4.23.** Meno-, paluu- ja huoneilman suhteellisen kosteuden kuvaajat Tulilattia- ja sähkövastuspuolella.

Absoluuttisen kosteuden kuvaajat on esitetty kuvassa 4.24. Myös niissä näkyy korrelaatio huoneilman mittaustuloksiin. Muutosten suuruus meno- ja paluuilmassa on noin puolet huoneilman vastaavasta kuivaimen ollessa päällä. Ilman kuivainta muutokset ovat yhtä suuria ja kuivaimen käydessä syklistä noin kaksi kolmasosaa huoneilman muutoksista.





**Kuva 4.24.** Meno-, paluu- ja huoneilman absoluuttisen kosteuden kuvaajat Tulilattia- ja sähkövastuspuolella.

Adsorptiokuivain selvästi vähentää huoneilman vaikutusta meno- ja paluuilmaan.

### 4.3 Hylätyt mittaustulokset

Tutkimuksessa oli kolme mittauspistettä, joiden antamat tulokset päätettiin hylätä eriyistä. Syyt olivat voimakkaasti muusta datasta poikkeavat arvot tai koejärjestelyvaiheessa tapahtuneet arviointivirheet.

Varsinaisesta tutkimuslaatasta hylättiin yksi mittauspiste päällystämättömältä Tulilattia-puolelta k250-alueelta. Hylätty piste oli A5, joka sijaitsi 25 mm:n etäisyydellä paluupuolen kuivatusputkesta. Mittausjakson aikana se antoi menopuolen vastaavaan pisteeseen A1 nähden 10–25 % RH pienempiä kosteuden arvoja laskien jakson lopussa 64 % RH:in, kun A1:ssä vastaava arvo oli 71 % RH. Myös muut A-sektorin pisteet antoivat merkittävästi korkeampia arvoja. Mittausputken pää on todennäköisesti ajautunut laatan valuvaiheessa liian lähelle Tulilattia-putkea, jolloin mittauspiste kuivui muita pisteitä nopeammin.

Muut hylätyt mittauspisteet olivat umpiputkisessa laatasta olevat mittauspisteet (kirjanpidossa umpi 100 ja umpi 200). Mittausputkia asennettaessa etäisyydeksi lämmitysputkesta mitattiin puolet siitä mitä, se oli varsinaisessa laatasta k-jakojen keskellä. Mittauksien aikana umpiputkisen laatan tilanne isoon laattaan nähden todettiin kuitenkin vertailukelvottomaksi, koska vain toisella puolella mittauspistettä kulkeva lämmitysputki ei siltikään vastaa tilannetta, jossa rei'itettyjä putkia menee kaksi mittauspisteen molemmin puolin. Kyseisen laatan pisteet olivat läpi mittausjakson vertailuarvoksi tarkoitettuja pisteitä A3, B1, C2 48 ja D2 48 (kaikki Tulilattia-puolella k-jaon keskellä) kuivempia. Päällystämättömällä Tulilattia-puolella 25–50 mm:n etäisyydellä putkesta olevat mittauspisteet A1, A2, A4, C1 ja C3 olivat kuitenkin umpiputkisen laatan mittauspisteitä kuivemmat, joten tulosten erosta voidaan kuitenkin päätellä rei'itetyn putken kuivattavan ympärillään olevaa betonia umpinaista tehokkaammin. Nämäkään pisteet eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä varsinaisessa koelaatassa kulkee Tulilattia-putki myös toisella puolella, vaikkakin melko kaukana.

#### 4.4 Mittausten tarkkuutta heikentävät tekijät

Kun betonin sisälle asennetaan putki, toimii sen pää samalla kosketuspintana ympäröivään ilmaan, jonka kautta kosteus pääsee haihtumaan. Tämän seurauksena mittauspisteen ympäristö kuivuu muuta betonia nopeammin, jolloin mitatut kosteuden arvot ovat todellista matalampia. Jatkuvasti samasta reiästä mittaamiseen liittyvät epävarmuustekijät on käsitelty kappaleessa 2.3.1. Koejärjestelyssä kuivuminen minimoitiin tulppaamalla mittausputket mahdollisimman läheltä mittauspistettä mittausten aikana. Putket tulpattiin myös mittausten välillä. Lähes viiden kuukauden mittausjaksolla kuivumista ei kuitenkaan voi kokonaan estää. Ilmiön todellisten vaikutusten arvioimiseksi laatasta pitäisi vertailun vuoksi suorittaa näytepala- tai porareikämittaus samalta syvyydeltä, josta saatuja arvoja verrattaisiin kokeessa saatuihin. Kokeen aikana suoritettussa näytepalamittauksessa otettiin näytteet vain laatan pinnasta 5 mm:n syvyydeltä. Vertailumittausta ei sisällytetty tähän tutkimukseen, mutta se on mahdollista suorittaa myöhemmin toisessa tutkimuksessa.

Anturit mittaavat aina mittausputken pään ilmatilan suhteellista kosteutta. Mitä pienempi ilmatila on, sitä tarkemmin se vastaa betonin kosteutta. Mitattavan ilman tilavuus mini-

moitiin solumuovitulpalla, mutta mitattavassa ilmatilassa oli silti muutama kuutiosenttimetri ylimääräistä ilmaa, minkä seurauksena mitatut arvot eivät välttämättä ole täysin samoja betonin kanssa.

Yhdessä mittaussektoreista, A-sektorissa, oli viisi mittausputkea 25-50 mm:n etäisyydellä toisistaan samalla mittaussyvyydellä niin, että kukin niistä meni edellistä pidemmälle laatan sisälle. Mittauspiste A1 oli lähimpänä betonin ulkoreunaa ja A5 kauimpana siitä. Tarkempi esitys mittauspisteiden sijoittelusta on kuvassa 3.1. Mittauspisteiden kohdalla viereinen putki saattaa osittain estää kosteuden kulkua sivusuunnassa Tulilattia-putkea kohti, mikä näkyikin A-sektorin mittaustuloksissa välillä epäloogisen korkeina kosteusarvoina muista pisteistä saatuihin tuloksiin nähden.

Sähkövastuspuolella keskellä k-jakoa olevat mittauspisteet E2, F2, G1 ja H1 sijaitsevat suoraan sähkövastuslangan yläpuolella. Vastuslanka oli lähellä laatan pohjaa, jolloin erityisesti 100 mm:n syvyydessä olevat mittauspisteet olivat alttiina langan tuottaman lämmön kuivattavalle vaikutukselle. Kosteuden jakauma laatan korkeussuunnassa olikin sähkövastuspuolella huomattavasti Tulilattia-puolta tasaisempi (kappale 4.1.4). Vastuslankojen etäisyyttä mittausputkista ei mitattu ennen valua, eikä sitä voi jo valetusta laatasta enää todentaa. Lisäksi teräsverkko, johon vastuslangat oli sidottu, on saattanut liikahtaa valuvaiheessa. Sähkövastus on todennäköisesti nopeuttanut veden haihtumista myös betonin yläpinnasta, mikä on kasvattanut eroa suhteellisissa kosteuksissa entisestään. Ilmiön suuruuden arvioimiseksi olisi tarvittu vielä yksi vertailulaatta, jota olisi lämmitetty pelkällä sähkövastuksella. Koejärjestelyn puitteissa ei myöskään ollut mahdollista verrata järjestelmän toimivuutta muihin kuivatusmenetelmiin nähden.

Antureiden vajavainen määrä mittauspisteisiin nähden aiheutti sen, että mistään pisteestä ei saatu dataa koko mittausjaksolta yhtenäisesti, vaan kustakin mittauspisteestä saatiin mittaustuloksia kerrallaan aina vain muutaman päivän tai viikon ajalta. Mittausten välinen aika näkyy kosteuskuvaajissa lineaarisena interpolointina, joka ei täysin vastaa laatan kuivumiskäyttäytymistä samalla aikavälillä. Mittauspisteiden lämpötila on lisäksi vaihdellut eri ajanjaksoina, jolloin jokaiselta ajanhetkeltä ei ole olemassa ”oikeassa” lämpötilassa (+20...+25 °C, katso kappale 4.1.8) mitattua kosteuden arvoa, vaan kosteuden arvo saattaa lämpötilan heilahtelun seurauksena poiketa muutaman % RH:n todellisesta.

Tulilattia- ja sähkövastuspuolen meno- ja paluupuoli olivat eriytettyinä. Tarkoituksena oli, että sähkövastuspuolelle menevä ilma ei kulkisi lainkaan kanavalämmittimen kautta, mutta ilmavirrat sekoittuivat kuitenkin adsorptiokuivaimessa. Tämän seurauksena sähkövastuspuolelle menneen ilmavirran lämpötila oli noin +40 °C huonelämpötilan ollessa noin +25 °C. Tulilattia-puolen menoilman lämpötila oli samaan aikaan +50 °C, joten sähkövastuspuolen ilmavirrassa ehti tapahtua kuitenkin jonkin verran jäähtymistä. Lisäksi molemmilla puolilla meno- ja paluuilman mittaus tapahtui pisteessä, jossa k250- ja k450-alueiden ilmavirrat olivat sekoittuneet, joten eri k-jaoista ei saatu laskettua tarkkoja kosteusvirran arvoja, vaan pelkästään koko puolen kokonaiskosteusvirta. Ilmavirran nopeus

mitattiin kanavasta ennen Tulilattia- ja sähkövastuspuolen eriytymiskohtaa, josta ilman tilavuusvirta laskettiin poikkipinta-alan mukaan. Tilavuusvirta oletettiin jakautuvan tasan viidelle piirille (päälaatan kaksi k250-kiertoa ja kaksi k450-kiertoa sekä umpiputkinen laatta). Ilmavirran nopeutta ei mitattu piireissä erikseen.

Ilmavirran nopeutta, lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavat anturit laitettiin putken sisään sen kylkeen tehdystä reiästä. Reikä tiivistettiin elastisella massalla. Tiivistyksellä pyrittiin estämään puhallusilman sekoittuminen huoneilmaan, mikä olisi nostanut suhteellisen kosteuden arvoja ja laskenut lämpötilan arvoja. Ilmavirran nopeuden oletettiin myös olevan sama koko putken poikkileikkauksen alalla eikä tilavuusvirran laskemisessa otettu lainkaan huomioon ilman ja putken seinämien välistä kitkaa. Todellisuudessa virtausnopeus oli putken keskellä suurempi kuin reunoilla.

Eri olosuhteiden vaikutusta tutkittavan järjestelmän toimivuuteen ei tässä tutkimuksessa tutkittu. Tutkimustilan huoneilman lämpötila ja kosteus kyllä vaihtelivat mittausjakson aikana, mutta olosuhteiden vaihtelu oli ajoittain äkillistä, jolloin tietyt mittausarvot olivat voimassa liian vähän aikaa kerrallaan niiden vaikutusten tutkimiseksi. Huoneilma oli myös voimakkaasti riippuvainen sekä ulkoilmasta että tutkimuslaatasta siirtyvästä lämpöenergiasta, minkä vuoksi tiettyjen olosuhteiden luominen keinotekoisesti oli käytössä olleella välineistöllä mahdotonta.

Tutkimuslaatan eri muuttujia olivat k-jako, sähkövastuksen käyttö ja päällystys. Kaikissa muuttujissa oli kaksi vaihtoehtoa, joten erilaisia kombinaatioita oli  $2^3 = 8$ . Jokaista kombinaatiota kohti oli käytettävissä vain yksi sektori laatasta, joten kunkin yhdistelmän otoskoko oli  $n = 1$ . Tutkimuksen puitteissa ei ollut mahdollisuuksia suurempaan otoskokoan, joka olisi varmempien tulosten saamiseksi ollut tarpeellista. Suuremman otoskoon saamiseksi olisi tarvittu joko suurempi laatta tai useampia vastaavia laattoja. Lisäksi laatan eri sektorit olivat kiinni toisissaan, joten eri k-jaot ovat saattaneet vaikuttaa toisiinsa. Sähkövastuksen lämmitys on todennäköisesti jonkin verran vaikuttanut myös Tulilattia-puolen lämpötiloihin, varsinkin C- ja D-sektoreihin, jotka olivat välittömästi sähkövastuspuolen vieressä.

Verrokkilaatta oli pinta-alaltaan huomattavasti varsinaista koelaattaa pienempi. Laatalla oli siis reunapituutta suhteessa pinta-alaan enemmän, jolloin kosteus on päässyt haihtumaan laatan reunan ja muottimateriaalina käytetyn EPS:n rajapinnasta. Verrokkilaatta tosin kuivui tästä huolimatta huomattavasti varsinaista laattaa hitaammin, joten vaikutus on tuskin ollut kovin suuri.

Päällystys tehtiin puolen laatan alalle, joten kosteus on päässyt siirtymään sivusuunnassa betonia pitkin päällysteen alta. Ilmiö on mittaustuloksista päätellen ollut hyvin lievä; suuressa osassa muovin alle jääneistä mittaustuloksista kosteus joko pysyi paikallaan tai

nousi päällystyksen jälkeen. Kokonaan ilmiön poissulkemiseksi olisi tarvittu kaksi samankokoista samasta betonimassasta valmistettua laattaa samoihin olosuhteisiin, joista toinen olisi päällystetty.

Huoneilman lämpötilan ja kosteuden todettiin vaikuttavan meno- ja paluuilman vastaviiin arvoihin. Eri olosuhteiden vaikutusta laatan kuivumiseen ei kuitenkaan tutkittu kovin kattavasti tämän tutkimuksen puitteissa muutosten ollessa vähäisiä ja suurimmaksi osaksi satunnaisia. Näin ollen lämpötilassa ja kosteudessa tapahtuneen muutoksen vaikutuksia ei pysty mittaustuloksista kovin hyvin erottelemaan. Huoneilman absoluuttisen kosteuden lievä nousu vaikutti jopa kasvattavan putkien kautta tapahtuvan kosteusvirran suuruutta. Huoneilman korkeampi kosteus on saattanut hidastaa pinnan kautta tapahtuvaa veden haihtumista, jolloin kosteuden siirtyminen putkiin on ollut nopeampaa. Yksi vaihtoehto on myös paluupuolen anturin kohdalla tapahtuva ilmavuoto, joka nostaisi paluupuolelta mitatun ilman kosteutta ja näin ollen laskennan tuloksena saadaan todellista korkeampi kosteusvirran arvo. Anturin asennuskohta oli kuitenkin tiivistetty.

## 5. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin betonilaatan kuivumisnopeutta Tulilattia-järjestelmän avustuksella. Vertailukohtana toimi samassa tilassa ollut verrokkilaatta, jossa ei käytetty mitään ulkoista kuivatusmenetelmää. Varsinaisessa tutkimuslaatatassa tutkittiin putkien k-jaon, sähkövastuksen, päällystysten, adsorptiokuivaimen ja puhallusilman kanavalämmityksen vaikutusta laatan kuivumiseen.

Tulilattia-järjestelmä osoitti kykynsä nopeuttaa betonin kuivumista – tutkimuslaatan tärkeimmistä mittauspisteistä suuri osa kuivui kriittisiin kosteuspitoisuuksiin yli kuukautta ennen verrokkilaattaa. Johtopäätöstä tukee myös Tulilattia-putken ilmavirrasta laskettu kosteusvirran arvo, joka oli suurimman osan mittausjaksosta yli  $10 \text{ g/(m}^2\cdot\text{h)}$ . Tiheämpi putkien k-jako lyhensi laatan kuivumisaikaa. Todellisissa rakennuskohteissa suoritettavissa jatkotutkimuksissa voidaan tutkia saman k-jaon käyttämistä suuremmalla yhtenäisellä pinta-alalla, jolloin sen vaikutus saattaa näkyä paremmin.

Sähkövastuksen käyttö Tulilattian tukena kasvatti selvästi laatan kuivumisnopeutta. Teho näkyi sekä betonista mitattujen pisteiden nopeampana kuivumisena, että ilmavirrasta saatujen mittauksien avulla lasketun kosteusvirran suurempana arvona. Sähkövastuksen betoniin tuottama lämpöenergia on ilmeisen tehokas siirtämään kosteutta sivusuunnassa kohti Tulilattia-putkia, jolloin haihtuminen putkien rajapinnasta on ollut nopeampaa.

Päällystäminen, etenkin muovimatolla, pysäytti kuivumisen käytännössä kokonaan verrattuna päällystämättömään puoleen putkijaon keskellä. Osassa mittauspisteistä suhteellinen kosteus lähti jopa nousuun. Putkien vieressä betoni jatkoi kuivumista myös päällystettynä. Laatta oli jo suhteellisen kuiva, kun päällystys asennettiin. Päällystämättömän puolen kaikkien mittauspisteiden suhteelliset kosteudet laskivat alle 80 % RH:n mittausjakson aikana. Lisätutkimuksen aiheena voisi olla laatan kuivuminen, kun päällystys suoritetaan aikaisemmassa vaiheessa kosteamman betonin päälle.

Kuivain ja lämmitin molemmat vaikuttivat positiivisesti kosteusvirran suuruuteen, joista kuivain toimi selvästi tehokkaammin. Molempia kokeiltiin myös syklistä käynnillä, jolloin joko molemmat tai pelkkä lämmitin olivat ajastetusti päällä kuuden tunnin sykleissä. Paras tulos saatiin kuitenkin molempien ollessa jatkuvasti päällä. Erityisesti kuivaimen laittaminen ajastimen taakse pienensi kosteusvirran arvoa. Varsinkin sähkövastuspuolen kosteusvirta oli riippuvainen kuivaimesta; kosteusvirta kääntyi jopa negatiiviseksi kuivaimen ollessa pois päältä. Tulosten perusteella kuivaimen käyttö nopeuttaa huomattavasti betonin rakennusaikaisen kosteuden poistumista. Jatkotutkimuksissa on mahdollista selvittää kanavalämmittimen vaikutus kosteusvirtaan ilman kuivainta. Ilman puhallusnopeuden vaikutusta kuivumiseen voi myös tarkastella tarkemmin.

Laatan käytönaikaisen kosteusvahingon jälkeistä kuivumista ei tässä tutkimuksessa käsitelty. Tutkimuslaatta on jatkotutkimuksissa kuitenkin tarkoitus vielä kastella, jolloin nähdään äkillisen kastumisen aiheuttama muutos betonin sisältä ja ilmavirrasta mitattuihin arvoihin. Laatan kuivumista on myös tarkoitus seurata kastelun jälkeen päällystettynä ja ilman päällystystä. Järjestelmän toimivuutta aiotaan tutkia lisäksi muutamassa todellisessa rakennus- ja korjauskohteessa, jolloin käytettävissä on suurempi tutkittava pinta-ala, ja esimerkiksi päällystyksen vaikutusta voidaan tutkia kuivumisen eri vaiheissa. Kohteissa olisi lisäksi mahdollista verrata järjestelmän toimivuutta muihin kuivatusjärjestelmiin nähdessä samoissa olosuhteissa.

## LÄHTEET

Abd El-Razek, M.M., Abo-El-Enein, S.A. 1999. Moisture performance through fresh concrete at different environmental conditions, *Cement and Concrete Research* 29, s. 1819–1825.

Bakshi, M., Mobasher, B. 2011. Experimental observations of early-age drying of Portland cement paste under low-pressure conditions, Department of Civil, Environmental, and Sustainable Engineering, School of Sustainable Engineering and the Built Environment, Arizona State University, *Cement & Concrete Composites* 33, s. 474–484.

Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus: Rakennusfysiikka, Rakennustieto Oy, 150 s.

By45/BLY7: Betonilattiat 2002, Suomen Betoniyhdistys ry, Suomen Betonilattiayhdistys ry. 2002. Jyväskylä, 175 s.

Haapaniemi, M. 2014. Vuotovahinkoselvitys 2012–2013, Finanssialan keskusliitto, 56 s.

Harderup, L-E. 1991. Concrete slab on the ground and moisture control. Verification of some methods to improve the moisture conditions in the foundation, väitöskirja, Lund Institute of Technology,, 174 s.

Hilden, S. 1998. Helsingin koulujen kosteusvauriot, Sisäilmastoseminaari 1998, Sisäilmayhdistys ry, Espoo, s. 63–66.

Hirvonen, M-R., Huttunen, K., Jussila, J., Komulainen, H., Kosma, V-M., Nevalainen, A., Pelkonen, J. 2000. Hometalojen terveyshaittojen kokeellinen tutkimus, Sisäilmastoseminaari 2000, Sisäilmayhdistys ry, Espoo, s. 227–230.

Hyvärinen, A., Halla-aho, J., Korppi, M., Vahteristo, M., Pekkanen, J., Husman, T., Saarela, K., Nevalainen, A. 1999. Homealtistus ja lasten astma – tapaus-verrokkitutkimus, Sisäilmastoseminaari 1999, Sisäilmayhdistys ry, Espoo, s. 197–198.

Kettunen, A-V., Piironen, J. 2000. Maanvaraisen betonilaatan ja rakennuspohjan kuivattaminen radonin torjunnassa käytetyllä rakennuspohjan tuuletusjärjestelmällä, Sisäilmastoseminaari 2000, Sisäilmayhdistys ry, Espoo, s. 361–366.

Lehtimäki, P., Tommola, E. 2015. Talon lattioiden kuivattaminen ilmakiertoisella lattia-lämmityksellä, Tulilattia Oy, Passiivikivitalot, 5 s.

Leivo, V., Rantala, J. 2004. Thermal and moisture conditions of coarse-grained fill layer under a slab-on-ground structures in cold climate, Tampere University of Technology, Laboratory of Structural Engineering, *Therm Envelope Build Sci* 28, s. 45–60.



Leivo, V., Rantala, J. 2008. Moisture Behaviour of slab-on-ground structures in operating conditions: Steady-state Analysis, Tampere University of Technology, Laboratory of Structural Engineering, Construction and Building Materials 22, s. 526–531.

Leivo, V., Rantala, J. 2009. Drying of in situ cast concrete ground slabs and covering criteria, Institute of Structural Engineering, Tampere University of Technology, Building and Environment 44, s. 331–337.

Leivo, V. 2015. Tulilattia-lämmitysjärjestelmän lämpö- ja kosteustekninen toiminta asuntomessutalossa, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikka, Tutkimusselostus TRT/2390/2015.

Loikkanen, P., Palomäki, E., Lappalainen, S., Kähkönen, E., Reijula, K., Laakkonen, H., Lappi, S., Hemminki, K. 1997. Koulurakennusten kosteus- ja homeongelmien tutkiminen Espoon, Helsingin ja Vantaan kaupungeissa, Loppuraportti, Työterveyslaitos.

Lumme, P., Merikallio, T. 1997. Betonin kosteuden hallinta, Suomen betonitieto, 31 s.

Meklin, T., Koivisto, J., Husman, T., Haverinen, U., Halla-aho, J., Nevalainen, A. 1998. Toimintamalli kosteus- ja homevaurioiden selvittämisessä, Sisäilmastoseminaari 1998, Sisäilmayhdistys ry, Espoo, s. 67–70.

Meklin, T., Husman, T., Vahteristo, M., Vepsäläinen, A., Hyvärinen, A., Koivisto, J., Halla-aho, J., Immonen, J., Hirvonen, M-R., Nevalainen, A. 2000. Koulujen homekorjausten vaikutukset altistumiseen ja terveyteen, Sisäilmastoseminaari 2000, Sisäilmayhdistys ry, Espoo, s. 241–244.

Merikallio, T., Lumme, P. 1997. Betonilattian rakennekosteus ja kosteuden mittaaminen, Sisäilmastoseminaari 1997, Sisäilmayhdistys ry, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, s. 219–224.

Merikallio, T. 2002. Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi, Suomen betonitieto, 62 s.

Merikallio, T. 2009. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa, väitöskirja, TKK Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos, Espoo, 136 s.

Munir, AKM., Björkstén, B. 1997. Health risk assessment of mould allergen exposure, *Acta Pædiatr* 86: 1153–4.

Orantie, K. 1988. Betonin rakennuskosteuden hallinta ja kuivatuksen nopeuttaminen, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo.

Pessi, A-M., Peltola, K., Suonketo, J., Pentti, M., Rantio-Lehtimäki, A. 2000. Betonielementtikerrostalojen ulkoseinän eristetilassa esiintyvän mikrobikasvun vaikutus sisäilmaan, Sisäilmastoseminaari 2000, Sisäilmayhdistys ry, Espoo, s. 119–124.

RT 14-10984. 2010. Betonin suhteellisen kosteuden mittausta. Rakennustieto Oy, Rakennustietosäätiö RTS, 16 s.

Taskinen, T., Meklin, T., Nousiainen, M., Husman, T., Nevalainen, A., Korppi, M. 1998. Koulujen sisäilma lasten terveysongelmien aiheuttajana, Sisäilmastoseminaari 1998, Sisäilmayhdistys ry, Espoo, s. 59–62.

Torikka, K. 1999. Kosteusvauriokorjausten laadunvarmistus, Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennustekniikan osasto, talonrakennustekniikka, 106 s.

Vinha, J. 2011. RTEK-3511 Rakennusfysiikka luentomoniste Osa 2, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, 246 s.

**ANTUREIDEN SIIRTOLOKI**

ANTURI	11.4.	28.4.	3.5.	4.5.	16.5.	17.5.	18.5.
1	D1	D2 100	H1	D2 25	B1	A4	G1 25
2	Keski-ilma	-	-	-	-	-	-
3	D2 48	D2 25	A4	D2 48	D1	A5	E1
4	F1	D3	C1	D2 100	D3	C1	E2 25
5	F3	B1	C3	F2 25	F1	C2 100	E2 48
6	F2 48	A1	E1	F2 48	F3	C2 48	E2 100
7	A2	A5	E3	F2 100	H1	C2 25	E3
8	A3	C2 100	E2 100	G1 25	A3	G1 48	Verrokki
9	Paluuilma	-	-	-	-	-	-
10	Umpi 200	C2 48	E2 48	G1 48	A2	G1 100	Umpi 200
11	Verrokki	C2 25	E2 25	G1 100	A1	C3	Umpi 100
12	Menoilma	-	-	-	-	-	-
13	A4	F2 48	-	Pinta sähkö	-	-	-
14	Paluuilma sähkö	-	-	-	-	-	-
15	Menoilma sähkö	-	-	-	-	-	-
16	Huoneilma	-	-	-	-	-	-

ANTURI	19.5.	23.5.	24.5.	25.5.	27.5.	30.5.	16.6.
1	-	D1	F3	C2 25	F2 25	-	B1
2	-	-	-	-	-	-	-
3	-	D2 25	A1	C3	F2 48	-	D1
4	-	D2 100	A2	G1 48	F2 100	Sähkö keski	D3
5	-	D3	A3	-	TL keski	-	F1
6	-	F1	A4	G1 100	Sähkö keski	F2 100	F3
7	-	F2 25	A5	Umpi 100	TL putki	-	H1
8	D2 48	F2 48	C1	Verrokki	D2 25	-	A1
9	-	-	-	-	-	-	-
10	-	F2 100	C2 100	-	D2 48	-	A2
11	B1	H1	C2 48	-	D2 100	-	A3
12	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	Verrokki	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-

ANTURI	17.6.	18.6.	29.6.	30.6.	5.7.	19.7.
1	A4	E1	D2 25	-	-	B1
2	-	Keski-ilma	-	-	-	-
3	A5	E2 25	-	TL keski	-	D1
4	C1	E2 48	-	TL putki	F2 100	D3
5	C2 100	E2 100	-	Sähkö keski	-	F1
6	C2 48	E3	D2 48	-	-	F3
7	C2 25	G1 100	D2 100	-	-	H1
8	C3	G1 48	F2 25	-	-	Verrokki
9	-	Paluuilma	-	-	-	-
10	Umpi 100	G1 25	F2 48	-	-	Umpi 100
11	Umpi 200	Verrokki	F2 100	-	TL putki	Umpi 200
12	-	Menoilma	-	-	-	-
13	-	Pinta TL putki	-	-	-	-
14	-	Paluuilma sähkö	-	-	-	-
15	-	Menoilma sähkö	-	-	-	-
16	-	Huoneilma	-	-	-	-

ANTURI	11.8.	14.8.	18.8.
1	D2 25	A4	E2 48
2	-	-	-
3	D2 48	A5	E2 100
4	D2 100	C1	E3
5	F2 25	C2 100	G1 25
6	F2 48	C2 48	G1 48
7	F2 100	C2 25	G1 100
8	A1	C3	TL Keski
9	-	-	-
10	A2	E1	TL Putki
11	A3	E2 25	Sähkö keski
12	-	-	-
13	-	-	-
14	-	-	-
15	-	-	-
16	-	-	-

# ANTUREIDEN KALIBROINTIODISTUS



20.9.2016

TULILATTIA OY  
Lapinniemenranta 4  
33180 Tampere

## KALIBROINTITODISTUS

Vaisala Oy:n valmistamat kosteus- ja lämpötilamittapäät kalibroitiin kolmessa eri suolaliuoksessa huoneenlämmössä Vaisala Oy:n valmistamalla HMK 13B kosteuskalibrointilaitteella, jonka oikeellisuus varmistetaan HMP233 kosteus- ja lämpötilalähtimillä. Lähettimien oikeellisuutta seurataan Vaisala Oy:n valmistamalla HMK15 kosteuskalibraattorilla.

### Kosteus- ja lämpötilamittapää HMP40S

Kosteus- ja lämpötilamittapäiden näyttämät lukemat ennen kalibroinnin perusteella tehtyä ohjelmointia.

Referenssit RH ja lämpötila	10,8 %	74,1 %	99,1 %	22,8 °C
tunniste sarjanumerot				
1 M1340653	12,6 %	75,1 %	97,2 %	22,8 °C
2 M1340654	12,4 %	75,3 %	97,3 %	22,8 °C
3 M1340655	11,5 %	73,3 %	96,4 %	22,9 °C
4 M1340649	12,5 %	73,6 %	96,0 %	22,9 °C
5 M1340658	12,5 %	73,4 %	96,9 %	22,9 °C
6 M1340645	12,4 %	73,3 %	96,3 %	22,8 °C
7 M1340650	11,6 %	72,8 %	96,5 %	22,8 °C

### Kalibroinnin perusteella tehdyssä ohjelmoinnissa mittapäihin tallennetut referenssilukemat

		RH				T	
		ref.	Kalib	ref.	Mit	ref.	Kalib
1	M1340653	10,8 %	10,8 %	74,7 %	73,9 %	97,2 %	97,2 %
2	M1340654	10,8 %	10,8 %	73,7 %	74,0 %	97,9 %	97,9 %
3	M1340655	10,8 %	10,8 %	73,7 %	72,3 %	97,9 %	97,9 %
4	M1340649	10,8 %	10,8 %	74,2 %	74,5 %	97,3 %	97,3 %
5	M1340658	10,8 %	10,8 %	74,2 %	73,5 %	97,3 %	97,3 %
6	M1340645	10,8 %	10,8 %	74,4 %	75,0 %	97,4 %	97,4 %
7	M1340650	10,8 %	10,8 %	74,4 %	73,1 %	97,4 %	97,4 %

Kalibroinnin perusteella tehdyssä ohjelmoinnissa mittapäihin tallennetut referenssilukemat on rajattu sinisellä.

Ohjelmoinnin jälkeen mittapäiden näyttämät tarkastettiin 75 % RH referenssikosteudessa.

Espoossa 20.9.2016

Kyösti Nieminen  
asiantuntija, laboratorio

TULILATTIA OY  
Lapinniemenranta 4  
33180 Tampere

## KALIBROINTITODISTUS

Vaisala Oy:n valmistamat kosteus- ja lämpötilamittapäät kalibroitiin kolmessa eri suolaliuoksessa huoneenlämmössä Vaisala Oy:n valmistamalla HMK 13B kosteuskalibrointilaitteella, jonka oikeellisuus varmistetaan HMP233 kosteus- ja lämpötilalähtimillä. Lähettimien oikeellisuutta seurataan Vaisala Oy:n valmistamalla HMK15 kosteuskalibraattorilla.

### Kosteus- ja lämpötilamittapää HMP40S

Kosteus- ja lämpötilamittapäiden näyttämät lukemat ennen kalibroinnin perusteella tehtyä ohjelmointia.

Referenssit RH ja lämpötila		10,8 %	74,3 %	97,7 %	23,2 °C
tunniste	sarjanumerot				
8	M1340646	11,5 %	73,0 %	95,1 %	23,2 °C
9	M1340651	12,8 %	75,0 %	95,6 %	23,2 °C
10	M1340648	12,6 %	75,2 %	95,6 %	23,3 °C
11	M1340656	11,4 %	72,3 %	95,2 %	23,1 °C
12	M1340644	11,9 %	72,0 %	95,6 %	23,1 °C
13	M1340647	12,0 %	72,7 %	95,2 %	23,1 °C
14	M1340652	11,7 %	73,1 %	95,7 %	23,2 °C
Referenssit RH ja lämpötila		10,8 %	74,1 %	98,9 %	22,9 °C
15	M1340657	12,6 %	74,7 %	96,3 %	23,1 °C

### Kalibroinnin perusteella tehdyssä ohjelmoinnissa mittapäihin tallennetut referenssilukemat

		RH				T	
		ref.	Kalib	ref.	Mit	ref.	Kalib
8	M1340646	10,8 %	10,8 %	74,6 %	74,3 %	97,9 %	23,2 °C
9	M1340651	10,8 %	10,8 %	74,6 %	74,1 %	97,9 %	23,2 °C
10	M1340648	10,8 %	10,8 %	74,7 %	75,4 %	97,2 %	23,6 °C
11	M1340656	10,8 %	10,8 %	73,9 %	73,6 %	97,6 %	23,6 °C
12	M1340644	10,8 %	10,8 %	73,9 %	72,7 %	97,6 %	23,6 °C
13	M1340647	10,8 %	10,8 %	73,9 %	74,1 %	97,3 %	23,4 °C
14	M1340652	10,8 %	10,8 %	73,9 %	72,5 %	97,3 %	23,4 °C
15	M1340657	10,8 %	10,8 %	73,8 %	74,0 %	97,9 %	23,2 °C

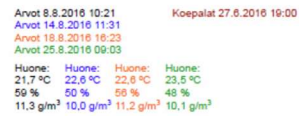
Kalibroinnin perusteella tehdyssä ohjelmoinnissa mittapäihin tallennetut referenssilukemat on rajattu sinisellä.

Ohjelmoinnin jälkeen mittapäiden näyttämät tarkastettiin 75 % RH referenssikosteudessa.

Espoossa 20.9.2016

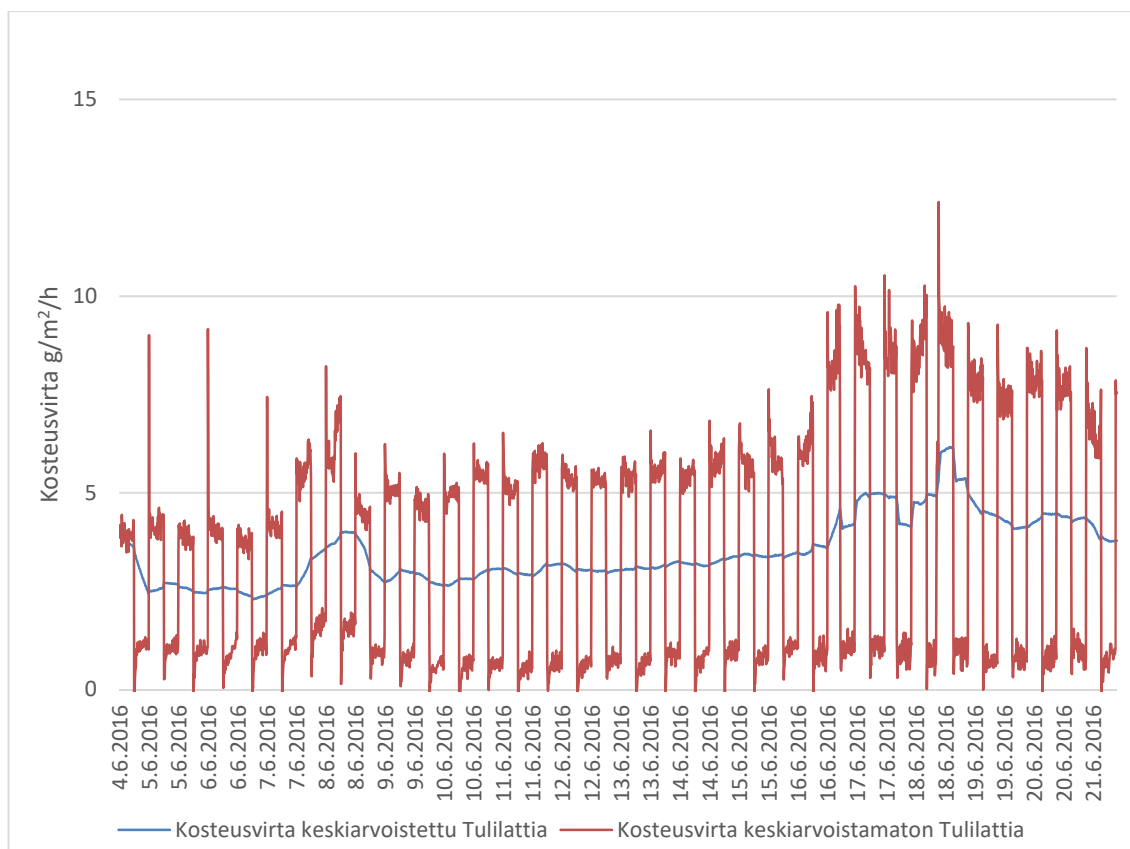


Kyösti Nieminen  
asiantuntija, laboratorio



## KESKIARVOISTETTU JA KESKIARVOISTAMATON KUVAAJA

Kanavalämmittimen ja adsorptiokuivaimen ollessa syklisesti päällä kosteusvirran ero oli hyvin suuri jaksojen välillä. Tulosten raportoinnissa otettiin käyttöön laskettujen arvojen liukuva keskiarvo niin, että kultakin mittaushetkeltä laskettiin edeltävän 12 tunnin keskiarvo. Tällöin keskiarvossa oli mukana tasapuolisesti aina kuuden tunnin jakso, jolloin kuivain ja lämmitin olivat päällä ja kuuden tunnin jakso, jolloin ne olivat pois päältä. Alla olevassa kuvassa on esimerkki keskiarvoistetusta ja keskiarvoistamattomasta kosteusvirran kuvaajasta samalta ajanjaksolta.





## BETONIMASSAN LABORATORIOTULOSTE

Laboratoriotuloste  
Kuormakirja: 74774

1.4.2016

## Reseptin tiedot

Koodi	76318	Kloridipitoisuusluokka	Cl 0,20
Suhteitusryhmä	LATTIABETONI/LN	Suojahuokossuhde	0,00
Lujuusluokka	C25/30	Vesi-sementtisuhde	0,00
Notkeusluokka	S3		
Raekoko	16		
Huomautuksia			
Rasitusluokat	[XC1:50,100,-] [XC2:50,100,-] [X0:50,100,-] [XC3:50,-,-] [XC4:50,-,-]		

## Kuormakirjan tiedot

Vastuuosasto		Mylläri	LBTRE
Projekti/Viite		Sekoitin	1
Asiakasnumero		Valmistus alkoi	1.4.2016 7:40:13
Asiakas	TULILATTIA OY	Valmistus päättyi	1.4.2016 7:40:13
Toimitusosoite	ATANVÄYLÄ 1/TAMPERE	Kuorman koko	
Suunniteltu käyttöikä	50	Tavoite	1,50m³
Rasitusluokat	XC1	Toteutunut	1,45m³

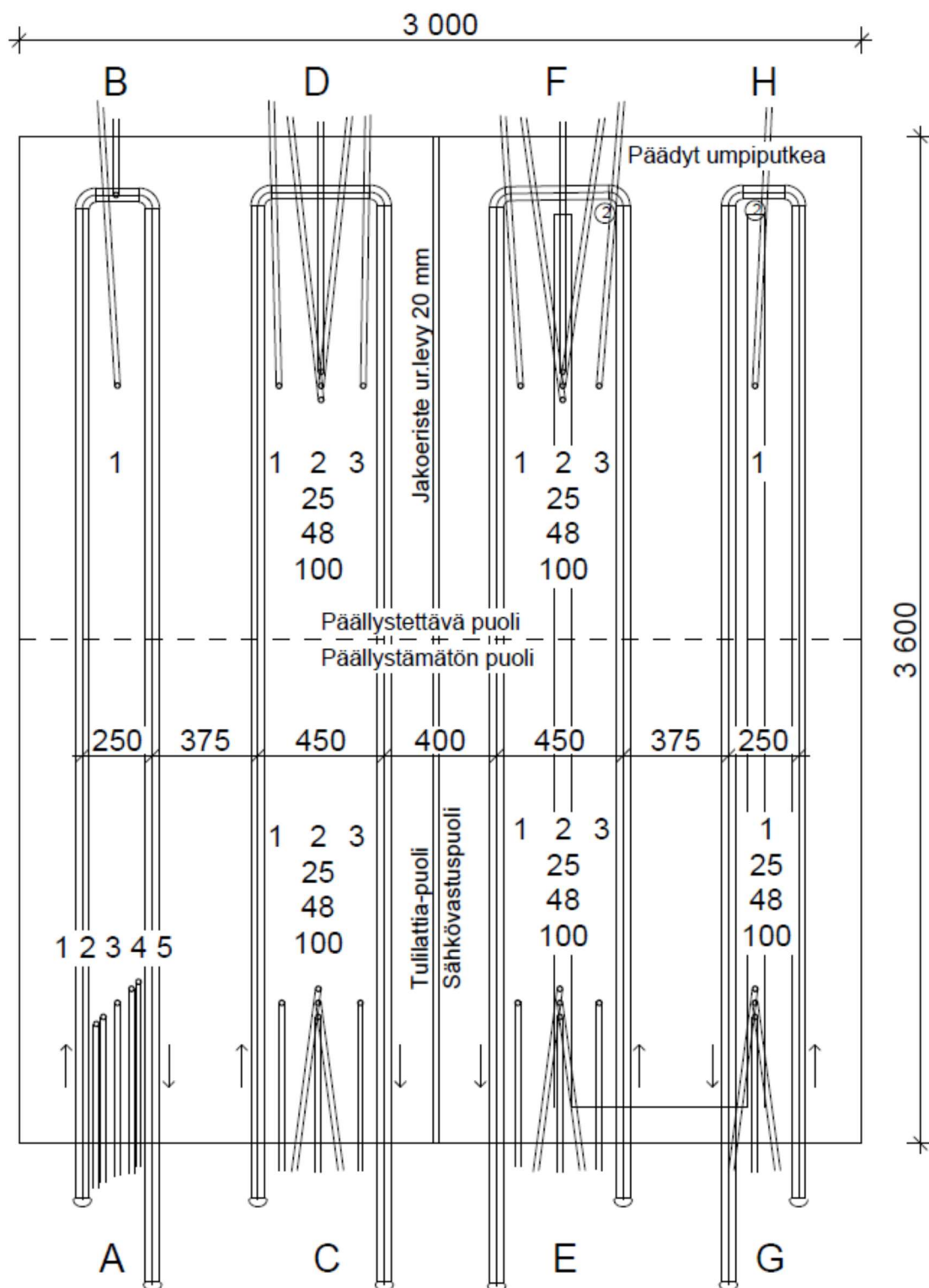
## Komponentit

Komponentti	CEM 2/42,5N/4	0-8	6-16	fill	Kylmä vesi
Tavoite	450,00kg	1 544,32kg	829,76kg	451,50kg	64,97kg
Toteutunut	460,40kg	1 499,00kg	837,00kg	454,00kg	64,90kg
Virhe	10,40kg/2,31%	-45,32kg/-2,93%	7,24kg/0,87%	2,50kg/0,55%	-0,07kg/-0,10%
Lämpötila	15,00°C	61,00°C	35,00°C	24,00°C	10,00°C
Kosteus-%		4,10%	1,50%	7,50%	
Absorptio-%	1,00%	0,60%	0,30%	0,10%	
Aktiivisuuserroin	1,00				
Komponentti	Kuuma vesi	NOTKISTIN/3			
Tavoite	97,45kg	1,35kg			
Toteutunut	97,70kg	1,40kg			
Virhe	0,25kg/0,26%	0,05kg/3,70%			
Lämpötila	60,00°C	15,00°C			

## Yhteenveto (yhdelta kuutiolle betonia)

Vesimäärä	Sementtimäärä	Vesi-sementtisuhde (w/c)
Tavoite	Tavoite	Tavoite
200,00kg	300,00kg	0,67
Toteutunut	Toteutunut	Toteutunut
182,63kg	316,48kg	0,58
Tavoite tehollinen	Tavoite EN206-1	Tavoite EN206-1
192,19kg	300,00kg	0,64
Toteutunut tehollinen	Toteutunut EN206-1	Toteutunut EN206-1
174,45kg	316,48kg	0,55
	Sementtiseosainemäärä	Vesi/(sementti + k x seosaine)-suhde
	Tavoite EN206-1	Tavoite EN206-1
	300,00kg	0,64
	Toteutunut EN206-1	Toteutunut EN206-1
	316,48kg	0,55
Kiviaineksen tilavuusosuus	69,60%	
Kiviaineksen massaosuus	78,69%	
Betonipasta	304,02l/m³	
Suhteellinen kutistuma	0,792mm/m³	

## TUTKIMUSLAATAN MITTAUSPISTEET



## MITTAUSSEKTOREIDEN KOSTEUSJAKAUMA

Kuvissa näkyy sektorin kosteusjakauma pysty- ja vaakasuunnassa. Näytettävät sektorit (A, C, D, E ja F) ovat ne, joissa oli mittauspisteitä myös Tulilattia-putkien lähellä. Ajanhetkeksi on valittu hetki, jolloin keskimmäisen pisteen (A3, C2 48, D2 48, E2 48 ja F2 48) suhteellinen kosteus on ollut 90 % RH. Mikäli piste on saavuttanut alle 90 % RH suhteellisen kosteuden ennen mittaamisen aloitusta, on dokumentoidun ajanhetken suhteelliseksi kosteudeksi valittu 85 % RH.

